



## Estimation des ressources éoliennes et solaires au Mali

**Badger, Jake; Kamissoko, Famakan; Olander Rasmussen, Mads; Larsen, Søren Ejling; Guidon, Nicolas; Hansen, Lars Boye; Dewilde, Luc; Nørgård, Per Bromand; Nygaard, Ivan**

*Publication date:*  
2012

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Badger, J., Kamissoko, F., Olander Rasmussen, M., Larsen, S. E., Guidon, N., Hansen, L. B., Dewilde, L., Nørgård, P. B., & Nygaard, I. (2012). *Estimation des ressources éoliennes et solaires au Mali*. UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development. Department of Management Engineering. Technical University of Denmark (DTU). [http://www.frsemali.org/reports/00 final reports/Estimation de ressources eolienne et solaire.pdf](http://www.frsemali.org/reports/00%20final%20reports/Estimation%20de%20ressources%20eolienne%20et%20solaire.pdf)

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



## Estimation des ressources éoliennes et solaires au Mali

DANIDA contrat 1711

Faisabilité des ressources d'énergies renouvelables au Mali

Décembre 2012

**Auteurs:** Jake Badger, Famakan Kamissoko, Mads Olander Rasmussen, Søren Larsen, Nicolas Guidon, Lars Boye Hansen, Luc Dewilde, Maiga Issa Alhousseini, Per Nørgaard, Ivan Nygaard

**Titre:** Estimation des ressources éoliennes et solaires au Mali

**Décembre 2012**

**ISBN 978-87-92706-56-0**

**Contrat:**

DANIDA contrat 1711

**Page de couverture:**

Mât de mesure

**Photo:** Famakan Kamissoko

UNEP Risø Centre  
Department of Management Engineering  
Technical University of Denmark  
Risø Campus  
Frederiksborgvej 399, P.O. Box 49  
Building 142  
4000 Roskilde,  
Denmark  
Direct + 45 46775115  
Fax + 45 46321999  
Skype: ivan.nygaard3

# Sommaire

Liste des acronymes	2
1 Préface	3
2 Ressources éoliennes – Atlas éolien observationnel	5
2.1 Introduction	5
2.2 Récapitulatif des sites de relevé	6
2.3 Résumé du traitement des données	7
2.4 Analyse avec WAsP	9
2.5 Climats éoliens généralisés	11
3 Ressources éoliennes – Atlas éolien numérique	14
3.1 Introduction	14
3.2 Description du modèle	15
3.3 Données météorologiques initiales	17
3.4 Système de classification	18
3.5 Traitement a posteriori	20
3.6 Résultats	20
3.7 Erreur et incertitude	25
3.8 Vérification	26
3.9 Application de données utilisant WAsP	34
3.10 Résumé	37
3.11 Remerciements	38
4 Ressources solaires	39
4.1 Méthodologie	39
4.2 Données	39
4.3 Calibrage	42
4.4 Validation	45
4.5 Ressources solaires	46
4.6 Résumé, analyse et conclusion	52
5 Références	53
ANNEXE A : Vue d'ensemble du chronométrage des mesures	55
ANNEXE B : Vitesse du vent et rayonnement solaire mesurés	57
ANNEXE C : Numéros de série des capteurs	72
ANNEXE D : Cartes du rayonnement solaire annuel et mensuel	73

## Liste des acronymes

CNESOLER	Centre national de l'énergie solaire et des énergies renouvelables
CRP	Centre Risø du PNUE
DANIDA	Agence danoise de développement internationale
DGG	Département de géographie et de géologie
DNE	Direction nationale de l'énergie
DSSF	Flux de rayonnement descendant ondes courtes de surface (Down-welling Surface Short-wave Radiation Flux)
EDM	Electricité du Mali
ENI-ABT	Ecole nationale d'ingénieurs - Abderhamabe Baba Touré
GLCC	Classification globale de la couverture terrestre (Global Land Cover Classification)
GMT	Temps universel
GRAS	Geographic Resource Analysis & Science A/S
IFNS	Inverse du carré du nombre de Froude
KAMM	Modèle atmosphérique à méso-échelle de Karlsruhe
LSA-SAF	Analyse de la surface du sol – Installation d'applications de satellite
MBC	Domaine central
MBN	Domaine septentrional
MBS	Domaine méridional
MCP	Méthode de mesure/corrélation/prédiction
MFC	Mali Folkecenter Nyetaa
MMEE	Ministère des mines, de l'énergie et de l'eau
MSG	Satellite Météosat de deuxième génération
NASA	National (USA) Aeronautics and Space Administration (Agence nationale (américaine) de l'aéronautique et de l'espace)
NCAR	National (USA) Center for Atmospheric Research (Centre national (américain) de recherche atmosphérique)
NCEP	National (USA) Center for Environmental Prediction (Centre national (américain) de prévision environnementale)
NGA	National (USA) Geospatial-Intelligence Agency (Agence nationale (américaine) de renseignement géospatial)
NRG systems	Marque de capteurs
NWA	Atlas éolien numérique
OWA	Atlas éolien observationnel
SEVIRI	Radiomètre imageur avancé visible et infrarouge en rotation
SRTM	Mission de cartographie radar de la Terre
SSE	Météorologie de surface et énergie solaire
STRM	Mission de cartographie radar de la Terre
URC	Centre Risoe du PNUE
USGS	United States Geological Survey (Commission géologique des Etats-Unis)
UTM	Système universel de coordonnées par projection transverse de Mercator
WasP	Logiciel d'analyse et d'application d'atlas éolien

# 1 Préface

La fourniture de services énergétiques abordable, fiable et respectueux de l'environnement est une condition préalable importante du développement de la société malienne. Actuellement, la demande d'électricité augmente d'environ 10 % par an, et la demande de carburant pour le transport augmente encore plus (BAD 2010). Cette situation se traduit par d'énormes difficultés pour le gouvernement malien et les opérateurs nationaux cherchant à réduire les importations de combustibles fossiles, ainsi que pour la société d'électricité nationale et les investisseurs privés s'efforçant de fournir suffisamment d'électricité à un prix raisonnable.

Une grande partie de la production d'électricité vient de l'hydroélectricité à grande échelle produite sur les fleuves Sénégal et Niger, mais les génératrices diesel petites et moyennes fournissent encore environ 20 % de la production totale. Même si des interconnexions sont prévues et installées pour satisfaire une partie de la demande avec l'électricité produite à partir du gaz naturel au Ghana et en Côte d'Ivoire, il existe encore de bonnes raisons politiques et économiques d'exploiter les abondantes ressources énergétiques renouvelables du pays, telles que l'hydro-énergie, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les résidus de la biomasse issus de l'agriculture et les cultures énergétiques destinées à la production de biocarburants liquides.

Depuis les années 1980, le Mali a lancé, en coopération avec un certain nombre de partenaires du développement, divers projets et programmes de développement visant à augmenter l'utilisation des sources d'énergie renouvelable. Le Ministère des mines, de l'énergie et de l'eau a élaboré une stratégie pour le développement des énergies renouvelables au Mali, qui a été adoptée par le Conseil des ministres le 26 décembre 2006 (MMEE 2007). Cette stratégie combine les efforts de réduction de la pauvreté, de validation des ressources énergétiques nationales, de garantie de la sécurité à long terme et de la viabilité environnementale de l'approvisionnement énergétique. Compte tenu de l'augmentation rapide des prix des carburants importés, tels que le gazole et l'essence, l'évaluation de la possibilité de donner aux sources d'énergie renouvelable un rôle central dans le futur système énergétique présente un intérêt croissant : ces sources d'énergie renouvelable respectueuses de l'environnement sont abondantes au Mali et deviennent de plus en plus concurrentielles.

Afin de planifier leurs futurs investissements dans le secteur des énergies renouvelables, les autorités énergétiques maliennes, Electricité du Mali (EDM), les opérateurs privés et les partenaires de la coopération internationale ont souhaité avoir une évaluation plus précise de l'importance et des variations des ressources d'énergies renouvelables au Mali. Par conséquent, l'Agence danoise pour le développement international (DANIDA), a financé une cartographie des ressources d'énergies renouvelables intitulée « Faisabilité des ressources d'énergies renouvelables au Mali ».

Une première phase d'évaluation du projet a eu lieu en 2007-2008. Le rapport du projet soumis en 2008 et intitulé « Carte provisoire des ressources d'énergie renouvelable du Mali » s'appuie entièrement sur des données satellite et des modèles météorologiques.

Le présent projet a poussé la première étude plus loin en ajoutant des mesures au sol des ressources éoliennes et solaires, ainsi que des études approfondies sur le terrain visant à évaluer les possibilités d'utiliser les déchets de la biomasse pour produire de l'énergie et les impacts socio-économiques de la culture du manioc pour produire du biocarburant. Toutefois, les ressources d'énergies renouvelables n'ont pas toutes été cartographiées. L'exception la plus importante est le stock de ressources d'énergie contenu dans la végétation ligneuse du Mali, qui ne peut pas être facilement évalué à l'aide de données satellite et est en cours d'évaluation par d'autres projets.

Le présent projet a produit 5 rapports principaux :

- 1) Analyse des possibilités de production durable de bioéthanol à partir du manioc au Mali
- 2) Résidus agricoles pour la production d'énergie au Mali
- 3) Etude de pré faisabilité d'une centrale électrique à paille de riz
- 4) Estimation des ressources éoliennes et solaires au Mali
- 5) Applications de production d'énergie éolienne et solaire au Mali : évaluation basée sur les cartes des ressources éoliennes et solaires du Mali

Ce projet est mené par un groupe incluant des départements universitaires, des institutions de recherche et des consultants, dirigé par le Centre Risø du PNUE (CRP) de l'Université technique du Danemark (DTU), en collaboration avec la Direction nationale de l'énergie (DNE) et le Centre national de l'énergie solaire et des énergies renouvelables (CNESOLER) du Mali. Les institutions sous-traitantes sont DTU Wind Energy, DTU Electrical Engineering, Geographic Resource Analysis & Science A/S (GRAS), Department of Geography and Geology (DGG), Université de Copenhague, Ea Energy Analyses, 3E, Ecole nationale d'ingénieurs-Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT) et Mali Folkecenter Nyetaa (MFC).

## 2 Ressources éoliennes – Atlas éolien observationnel

### 2.1 Introduction

Dans le cadre du projet, dix (10) mâts du type NRG Systems ® (USA) ont été érigés sur 14 sites au Mali, pour la collecte de relevés de grande qualité. Cette section comprendra une description de l'analyse des données éoliennes mesurées. L'analyse est effectuée pour calculer des statistiques climatiques généralisées à partir des données éoliennes observées. Cette analyse est d'une grande utilité pour l'évaluation des ressources éoliennes au voisinage du site de relevé et pour la validation de l'étude de l'atlas éolien numérique, décrite dans la Section 3.

Les relevés ont fait l'objet d'un contrôle de qualité et traitées par la société 3E en Belgique. Ensuite, pour utiliser les données pour une telle activité d'évaluation, il est nécessaire d'évaluer des spécificités locales qui influent particulièrement la mesure des vents autour des stations de relevé, comme la rugosité, l'état du relief et les obstacles, ainsi que de procéder à une analyse WAsP locale (voir section 2.4) pour nettoyer et homogénéiser les données de manière à obtenir des éléments rigoureusement locaux.

Les mâts érigés pour le recueil de données ont tous été mis en place et exploités par CNESOLER. Dix sites ont été choisis par CNESOLER pour fournir des relevés du vent pour des sites potentiels d'éoliennes ; les quatre derniers sites ont été sélectionnés par le projet pour assurer une répartition géographique aux fins de calibrage de l'atlas éolien. Les sites ont été identifiés dans les rapports de missions (Kamissoko 2008, 2009a, 2009b, 2010).

Tableau 2.1 : Tableau présentant le détail des codes et la localisation des sites.

Désignation du site	Code	Longitude	Latitude	Zone UTM	Vers l'est	Vers le nord
<b>Bandiagara</b>	BAN	-3.6026	14.3635	29	1082705	1594749
<b>Gao</b>	GAO	-0.0064	16.2524	30	820010	1799192
<b>Gossi</b>	GOS	-1.2836	15.8237	30	683820	1750185
<b>Goundam</b>	GOU	-3.6521	16.4040	30	430372	1813740
<b>Hombori</b>	HOM	-1.7113	15.2922	30	638368	1691052
<b>Kadiolo</b>	KAD	-5.7568	10.5660	29	854984	1169835
<b>Kangaba</b>	KAN	-8.4254	11.9457	29	562561	1320610
<b>Kayes</b>	KAY	-11.4084	14.4795	29	240394	1602123
<b>Koro</b>	KOR	-3.0939	14.0901	29	1138564	1565719
<b>Mopti/Sévaré</b>	MOP	-4.0843	14.5127	29	1030222	1610136
<b>Niafunké</b>	NIA	-3.9947	15.9350	30	393538	1761995
<b>Nioro</b>	NIO	-9.5774	15.2371	29	437993	1684633
<b>San</b>	SAN	-4.8932	13.2954	29	945155	1473479
<b>Tombouctou</b>	TOM	-2.9979	16.7300	30	500219	1849684



L'Annexe B présente de manière plus détaillée les caractéristiques des distributions de la vitesse et de la direction du vent mesurées, ainsi que les variations par mois de l'année et par heure du jour. En outre, l'Annexe C donne des informations sur les numéros de série des capteurs NRG Systems®.

## 2.2 Récapitulatif des sites de relevé

Les informations de localisation des mâts de relevé sont indiquées dans le Tableau 2.1. Une carte du Mali et de l'implantation du mât de relevé est présentée à la Figure 2.1. Les mâts sont identifiés par le code en trois lettres assigné dans le Tableau 2.1.

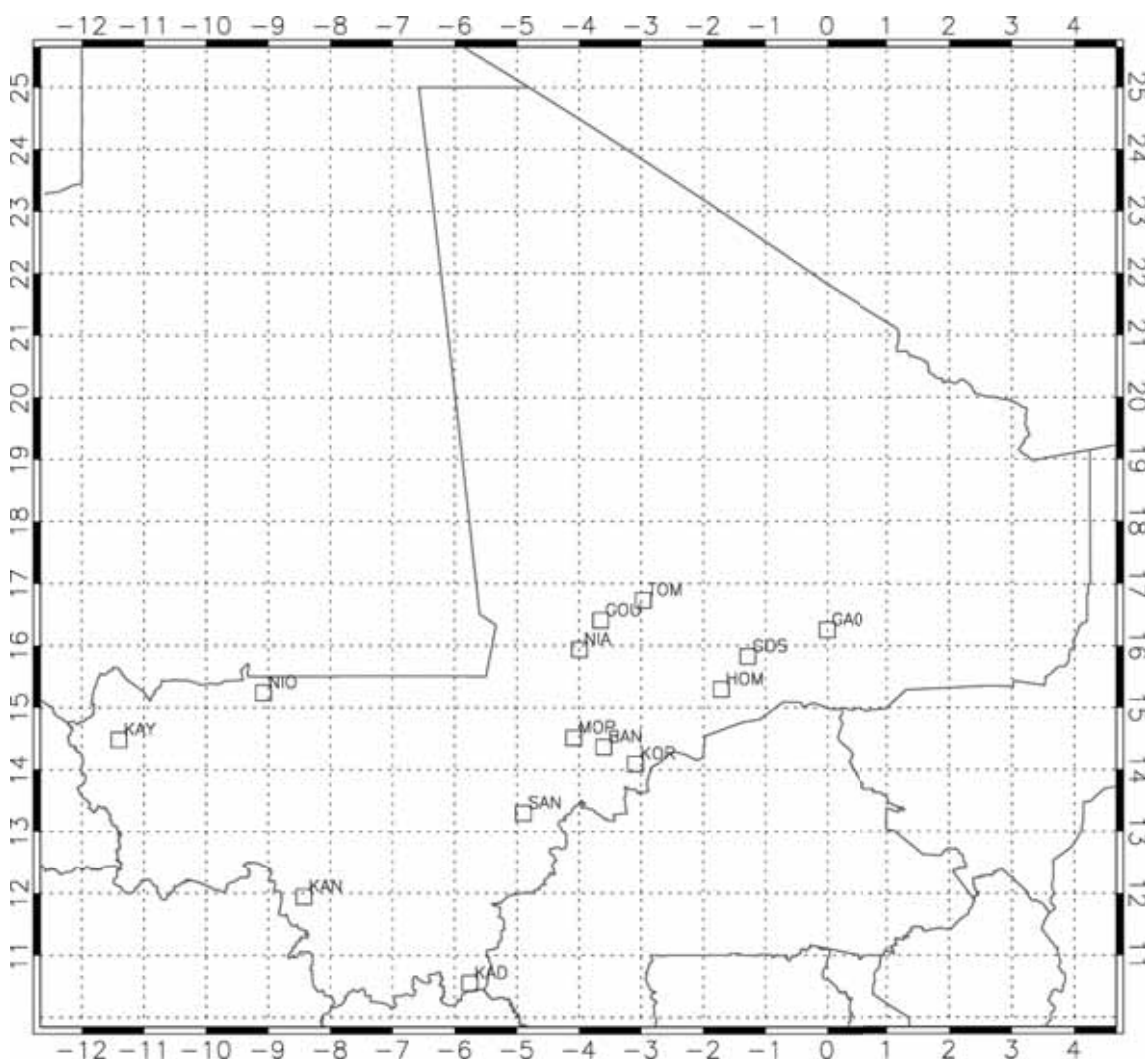


Figure 2.1 : Carte d'implantation des 14 sites de relevé éolien et solaire. Les axes sont indiqués en degrés de longitude et de latitude, respectivement. Les lignes indiquent les frontières internationales du Mali.

## 2.3 Résumé du traitement des données

La principale préoccupation relative au type d'anémomètres installés (NRG n° 40) est ce qu'on appelle le « phénomène de frottement sec » (effet de ralentissement) qui a affecté le NRG n° 40 en raison de problèmes de procédé de fabrication. L'effet de ralentissement concerne les numéros de série compris entre 26130 et 92049 ; ainsi, les seuls relevés à ne pas être affectés sont ceux des sept derniers sites (Bandiagara, San, Koro, Kadiolo, Kangaba, Kayes et Nioro). Les numéros de série des capteurs figurent à l'Annexe C.

L'effet de ralentissement se produit lorsqu'un anémomètre entre en vibration, ce qui est en particulier le cas dans la gamme des 4 à 10 m/s quand la vitesse du vent décroît. La magnitude du ralentissement est donc étroitement liée au régime éolien du site concerné. En outre, il affecte plus les valeurs élevées que les faibles valeurs. Il est toutefois impossible d'évaluer avec exactitude le moment où un anémomètre entre ou sort de ce mode vibratoire, sauf à installer un anémomètre non défectueux au même niveau. La magnitude du ralentissement est comprise entre 0,3 et 0,6 m/s et augmente avec le temps.

NRG a fourni les documents disponibles rédigés par des consultants partenaires avec lesquels des comparaisons ont été effectuées entre capteurs défectueux et non défectueux. Premièrement, l'un de ces documents indique que 87 des 99 anémomètres aux numéros de série compris entre 26130 et 92049 se sont avérés affectés par l'effet de ralentissement. Il est donc probable que la quasi-totalité des anémomètres de sept des 14 sites soient affectés. Une méthodologie a été élaborée pour évaluer si les relevés sont affectés ou non et quel anémomètre, dans une paire, est le plus affecté. L'application de cette méthode montre que tous les anémomètres sont plus ou moins affectés, mais que certains le sont probablement de façon modérée.

Bien que certains auteurs aient proposé des corrections, on a noté ici une réticence à appliquer les mesures correctives, car pour commencer, elles ont été évaluées sur la base d'un nombre de relevés très limité et, deuxièmement, sur des sites qui ne sont pas nécessairement représentatifs du régime éolien du Mali. En définitive, il a été décidé qu'il serait plus approprié d'éliminer les relevés qui paraissent les plus affectés par le ralentissement.

La recommandation finale a été d'exclure les relevés du niveau supérieur pour les sites de Gossi et Hombori, où seules les données relevées à 22 m doivent être utilisées. Pour le reste des sites où des anémomètres étaient affectés par le ralentissement, les relevés de l'anémomètre le moins affecté de la paire ont été utilisés.

Pour les sept derniers sites dont les anémomètres n'étaient pas affectés par ce ralentissement, l'effet d'ombre du mât a été éliminé des relevés de la paire d'anémomètres à chaque hauteur.

En outre, les observations suivantes sont mentionnées :

- L'un des anémomètres les plus élevés de Gossi a été endommagé au cours d'un épisode venteux en août 2009, mais cet anémomètre n'a de toute façon pas été pris en considération, parce qu'il était le plus affecté par le ralentissement au niveau supérieur de ce mât.
- Quelques périodes devraient être éliminées des relevés effectués à Tombouctou en octobre 2009.
- Quelques périodes étaient manquantes à Koro (un jour incomplet) et à Sévaré (quatre jours incomplets ou manquants).
- Quelques heures de données manquaient dans les relevés effectués à Kadiolo, Kangaba, Kayes et Nioro autour de la mi-mai 2011.
- La compensation d'aube était négligeable sur tous les sites sauf Tombouctou, pour lequel une compensation de 70° a été appliquée.
- L'enregistreur de données de Tombouctou a été configuré à GMT-1 au lieu de GMT0.

Tableau 2.2 : Tableau récapitulatif de la récupération de données des mâts de relevé et des hauteurs des anémomètres.

Désignation du site	Code du mât	Nombre total de lignes de données	Lignes de données relevées	Lignes de données alignées	% relevé	Hauteur des anémomètres [m]
<b>Bandiagara</b>	BAN	52560	52560	0	100.00	50, 30
<b>Gao</b>	GAO	52560	52560	0	100.00	40, 22
<b>Gossi</b>	GOS	52560	52560	0	100.00	22
<b>Goundam</b>	GOU	52560	52560	0	100.00	50, 30
<b>Hombori</b>	HOM	52560	52560	0	100.00	22
<b>Kadiolo</b>	KAD	52560	52488	72	99.86	40, 22
<b>Kangaba</b>	KAN	52560	52512	48	99.91	40, 22
<b>Kayes</b>	KAY	52560	52500	60	99.89	40, 22
<b>Koro</b>	KOR	52560	52518	42	99.92	50, 30
<b>Mopti/Sévaré</b>	MOP	52560	52560	0	100.00	40, 22
<b>Niafunké</b>	NIA	52560	52560	0	100.00	50, 30
<b>Nioro</b>	NIO	52560	52500	60	99.89	40, 22
<b>San</b>	SAN	52560	52560	0	100.00	50, 30
<b>Tombouctou</b>	TOM	52560	52424	136	99.74	40, 22

Dans un premier temps, les courtes périodes de données manquantes ont été complétées par une méthodologie MCP (mesure/corrélation/prédiction) à l'aide des données provenant des relevés offrant la meilleure concordance. Cependant, pour l'analyse WAsP qui suit, les valeurs MCP ont été rejetées, car en tout état de cause, la récupération de données est très bonne ; voir Tableau 2.2 pour une synthèse de la récupération de données pour chaque site.

Enfin, il convient de noter que les périodes de relevé des données utilisées dans l'analyse de 14 sites de mâts ne sont pas concordantes. Les périodes de relevé sur les sites des mâts sont indiquées dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Tableau indiquant les dates de début et de fin des périodes d'un an utilisées pour les sites de relevé.

Désignation du site	Code du mât	Période de relevé	Début (inclus)	Fin (inclus)	Durée
<b>Gao</b>	GAO	p1	08 nov.	09 oct.	1 an
<b>Gossi</b>	GOS	p1	08 nov.	09 oct.	1 an
<b>Hombori</b>	HAM	p1	08 nov.	09 oct.	1 an
<b>Mopti/Sévaré</b>	MOP	p1	08 nov.	09 oct.	1 an
<b>Goundam</b>	GOU	p2	09 mars	10 fév.	1 an
<b>Niafunké</b>	NIA	p2	09 mars	10 fév.	1 an
<b>Tombouctou</b>	TOM	p2	09 mars	10 fév.	1 an
<b>Bandiagara</b>	BAN	p3	09 juin	10 mai	1 an
<b>Koro</b>	KOR	p3	09 juin	10 mai	1 an
<b>San</b>	SAN	p3	09 juin	10 mai	1 an
<b>Kadiolo</b>	KAD	p4	10 sept.	11 août	1 an
<b>Kangaba</b>	KAN	p4	10 sept.	11 août	1 an
<b>Kayes</b>	KAY	p4	10 sept.	11 août	1 an
<b>Nioro</b>	NIO	p4	10 sept.	11 août	1 an

## 2.4 Analyse avec WAsP

WAsP est l'outil standard dans le métier pour l'évaluation des ressources éoliennes et contient une suite de modèles à micro-échelle de prédiction des ressources éoliennes dans la zone riveraine d'une station météorologique, en tenant compte de l'incidence des changements de rugosité et d'élévation. Le modèle de flux WAsP est un modèle linéaire à quadrillage polaire. Il se fonde sur une analyse des flux par-dessus les collines décrits dans Jackson et Hunt (1976). Le modèle de variation de la rugosité inclus dans WAsP tient compte du manque d'homogénéité de la rugosité de surface autour d'un site d'observation dans un périmètre d'environ 10 km. Une rugosité non homogène entraîne le développement de couches limites internes et l'effet de celles-ci sur le profil éolien est modélisé par secteur suivant les relations décrites dans Sempreviva et al (1989) et Rao et al (1974). WAsP comprend aussi un modèle d'obstacles, mais il n'est pas utilisé, car il n'y a pas d'obstacle affectant les sites. Les effets locaux au site de relevé sont éliminés avant de calculer et un climat éolien généralisé.

Le climat éolien généralisé peut alors être utilisé pour calculer le climat éolien d'un site voisin par prise en compte des variations locales d'élévation et de rugosité du nouveau site en utilisant les modèles contenus dans WAsP. Il est également possible d'utiliser WAsP pour prédire les ressources éoliennes à différentes hauteurs sur le site de relevé même, en tenant compte de l'incidence des couches limites internes dues à des variations de rugosité à proximité, de sorte que le profil s'écarte d'un profil logarithmique et des effets orographiques d'accélération, qui dépendent de la hauteur par rapport au sol. Aucune correction spécifique au site liée à la stabilité des couches limites n'est effectuée ; les paramètres par défaut de WAsP sont utilisés. Une description détaillée des modèles inclus dans WAsP est fournie au Chapitre 8 de Troen et Petersen (1989).

WASP nécessite une description de la topographie de surface (orographie : variations de l'élévation de surface, et longueur de la rugosité de surface). L'évaluation des conditions de longueur de la rugosité de surface autour de chaque station de relevé a été effectuée partiellement depuis le ciel, avec Google Earth et partiellement par des visites sur site. Tous les sites ont été visités plusieurs fois par le personnel de CNSOLER. Certains sites ont été visités par le personnel de DTU Wind Energy, du Danemark, en coopération avec CNSOLER. Les sites sélectionnés et les dates des visites sont indiqués ci-dessous :

Tombouctou :	2008.05.02
Nioro :	2011.05.15
Kayes :	2011.05.20
Kangaba :	2011.05.18
Kadiolo :	2011.05.19

La première des stations est située dans la région septentrionale sahélienne, les deux suivantes dans la partie occidentale et les deux dernières au sud du Mali. Les trois premières stations reflètent un relief sahélien assez lisse et ont été placées à proximité d'aéroports locaux, tandis que les deux dernières ont été installées dans des concessions de « station climatique » et sur un relief plus complexe, entouré de plus d'habitations et de zones au couvert végétal plus dense.

L'orographie a été déterminée à l'aide de l'ensemble de données SRTM, qui est un ensemble de données pratiquement mondiales, à une résolution d'environ 90 m. Pour chaque site de relevé, une carte orographique de 50 x 50 km a été créée, avec un intervalle de courbe de 10 m. Des lignes de changement de rugosité ont été insérées dans la carte en numérisant les phénomènes dominants grâce à l'imagerie satellitaire : limites entre rivières, lacs, villes et zones forestières. La longueur de la rugosité a été déterminée à partir de photos autour des sites et de l'imagerie satellitaire. Les valeurs de longueur de rugosité ont été affinées en recherchant la meilleure correspondance des climats éoliens généralisés dérivés d'anémomètres montés à des hauteurs différentes sur le même mât, lorsque cela était possible.

Une analyse de vérification WASP a été effectuée pour tous les sites sauf Hombori et Bandiagara, où seules les données de l'anémomètre le plus bas étaient disponibles. La priorité a été donnée à l'analyse des données générées par les anémomètres en position haute, mais une analyse ultérieure de Hombori et Bandiagara est également considérée comme utile. Dans la Figure 2.2, le logiciel WASP est utilisé pour analyser les données relevées à Nioro.

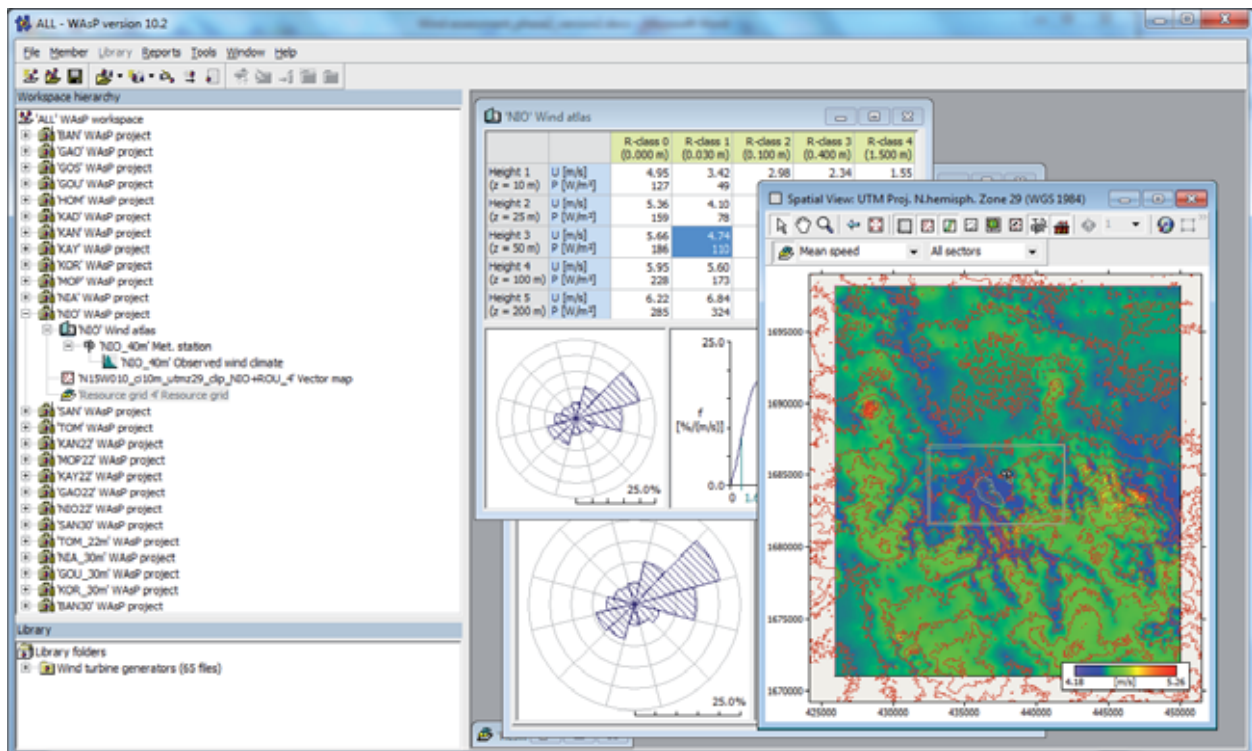


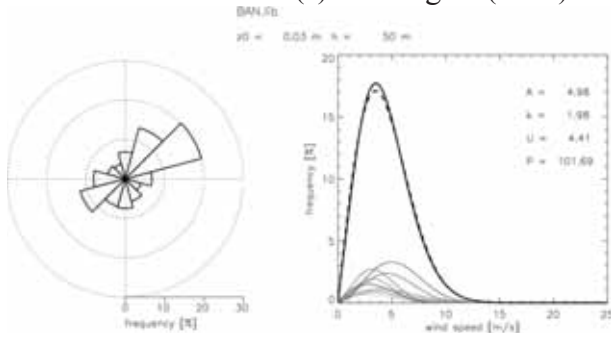
Figure 2.2 : Capture d'écran du logiciel WAsP pendant l'analyse des données relevées, dans ce cas à Nioro. La fenêtre de la carte indique la variation modélisée de la vitesse moyenne annuelle du vent de 40 m, en raison des caractéristiques orographiques et de variation de la longueur de la rugosité du paysage.

## 2.5 Climats éoliens généralisés

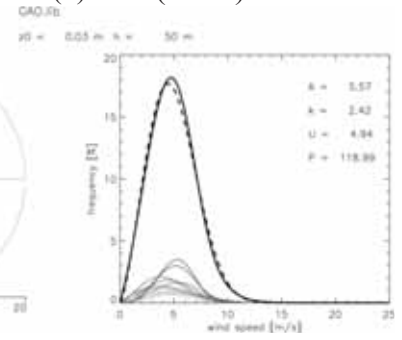
La Figure 2.3 présente la représentation graphique des climats éoliens généralisés des sites analysés. Les climats éoliens généralisés contiennent des informations sur la distribution de la fréquence de la vitesse du vent par secteur et la distribution de la fréquence de la direction du vent. La généralisation porte sur les conditions éoliennes pour un terrain plat et une rugosité de surface homogène. Dans le cas des climats tracés, les vents sont indiqués pour 50 m au-dessus d'une rugosité de 3 cm.



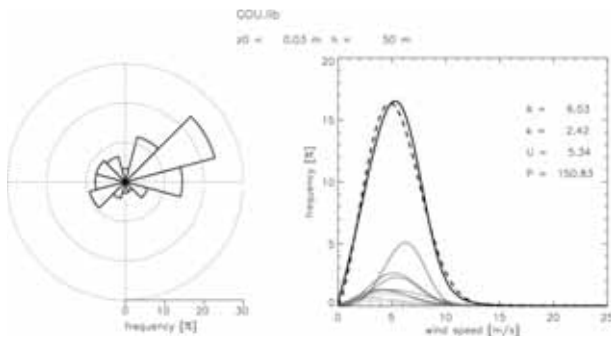
(a) Bandiagara (BAN)



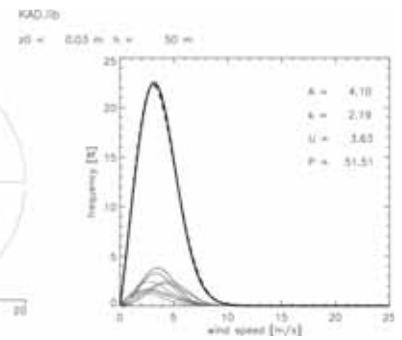
(b) Gao (GAO)



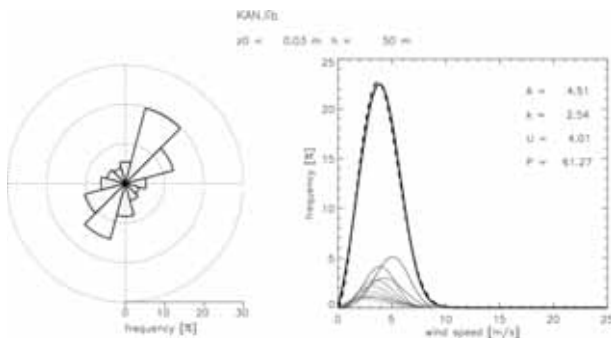
(c) Goundam (GOU)



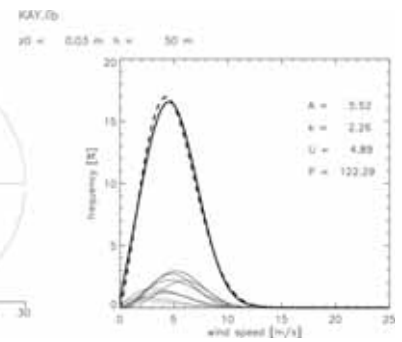
(d) Kadiolo (KAD)



(e) Kangaba (KAN)



(f) Kayes (KAY)



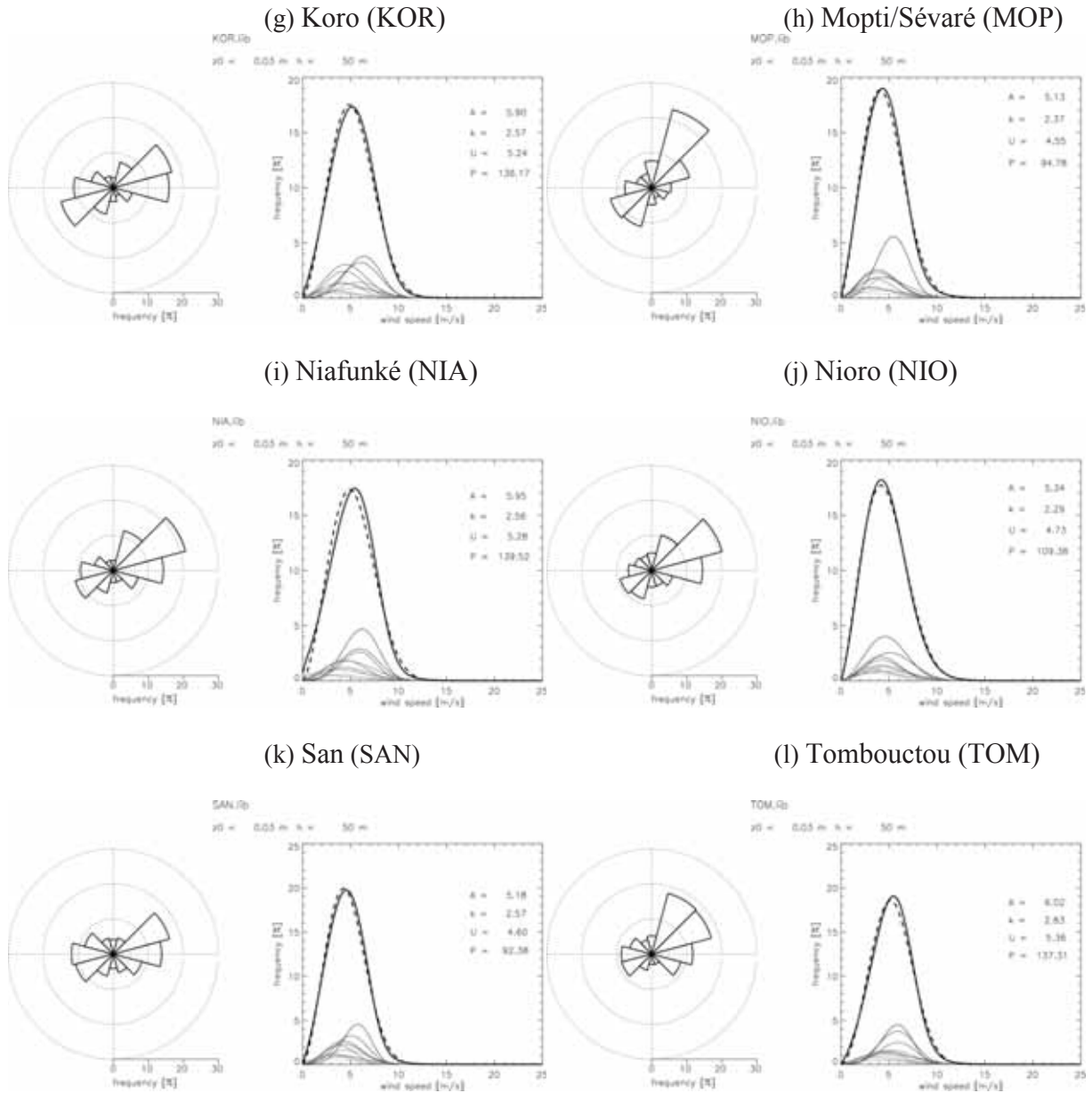


Figure 2.3 : Les graphiques montrent le climat éolien généralisé aux sites de relevé à 50 m pour des conditions standard, un terrain plat présentant une longueur de rugosité homogène de 3 cm. Les tracés en rose des vents indiquent la distribution de la fréquence de direction, tandis que le graphique en ligne indique les distributions de vitesse du vent. Les lignes grisées indiquent les distributions de vitesse du vent pour différents secteurs de directions. La ligne continue grasse indique la distribution de la vitesse du vent émergent, c'est-à-dire la somme des distributions par secteur. La ligne discontinue grasse indique les distributions de Weibull du total des distributions de vitesse du vent. Les valeurs imprimées donnent, pour la distribution totale de la vitesse du vent, les paramètres d'échelle ( $A$ ) et de forme ( $k$ ) de Weibull, la vitesse moyenne annuelle du vent ( $u$ ) en m/s et la densité de l'électricité ( $P$ ) en W/m².



## 3 Ressources éoliennes – Atlas éolien numérique

### 3.1 Introduction

La méthode conventionnelle utilisée pour produire des estimations des ressources éoliennes sur des zones ou régions étendues, éventuellement à l'échelle nationale, consiste à analyser les relevés éoliens collectés sur plusieurs sites de la région, comme dans l'Atlas éolien européen (Troen et Petersen, 1989), par exemple. Pour que cette méthode fonctionne bien, il faut disposer d'une quantité suffisante de données de grande qualité, couvrant tout le pays. Ce critère est parfois difficile à satisfaire et, de ce fait, d'autres méthodes sont nécessaires, des méthodes qui ne permettront pas d'obtenir des estimations de ressources d'une exactitude irréprochable mais qui, d'autre part, donneront généralement de bonnes indications de la distribution géographique de la ressource éolienne et seront donc très utiles pour la prise de décision et la planification des études de faisabilité.

Des méthodologies d'**atlas éolien numérique** ont été mises au point pour résoudre le problème d'insuffisance des relevés éoliens. L'une de ces méthodologies est la méthode KAMM/WAsP développée au Laboratoire national Risø (Frank et Landberg, 1997).

L'élément de véritable valeur ajoutée de la méthodologie d'atlas éolien numérique KAMM/WAsP est la capacité à appliquer les données d'atlas éolien généralisée dérivées à une micro-échelle à l'aide du logiciel WAsP. Cela permet à l'utilisateur de WAsP de procéder aux calculs de préfaçabilité pour tout site couvert par l'atlas éolien numérique et d'effectuer des estimations de production annuelle d'énergie pour un type d'éolienne et des caractéristiques spécifiques.

Dans la méthodologie KAMM/WAsP, on utilise une approche dite de **réduction d'échelle statistique/dynamique** (Frey-Buness et al, 1995). Cette méthode repose sur l'existence d'une relation robuste entre des situations météorologiques à grande échelle et des situations météorologiques à une petite échelle.

Les informations sur la situation météorologique à grande échelle sont librement accessibles par le biais de l'ensemble de données de ré-analyse NCEP/NCAR (Kalnay et al 1996). Cet ensemble de données a été créé par assimilation de données relevées dans le monde entier d'une manière cohérente, de 1948 à ce jour. Le principal objectif de la constitution de cet ensemble de données est de fournir une référence pour l'état de l'atmosphère et d'identifier toute caractéristique de changement climatique. Une autre application de l'ensemble de données est une mémoire à long terme des conditions éoliennes à grande échelle. Les données NCEP/NCAR sont utilisées pour créer une centaine de situations éoliennes de grande échelle, appelées classes de vent, représentatives du climat éolien à grande échelle.

Pour que ces classes de vent soient significatives à une moindre échelle, un modèle de moyenne échelle est utilisé pour établir de quelle manière le forçage du vent à grande échelle est modifié par la topographie à l'échelle régionale. En conséquence, pour chaque classe de vent, une simulation de modèle de moyenne échelle est effectuée à l'aide du Modèle atmosphérique à méso-échelle de Karlsruhe (KAMM) (Adrian et Fiedler, 1991).

Le traitement a posteriori des résultats de toutes les simulations fournit une carte des ressources éoliennes au niveau de résolution des simulations du modèle. Une analyse plus approfondie des résultats des simulations compte tenu de la topographie, tels que décrits dans le modèle à méso-échelle, permet d'obtenir des cartes d'atlas éolien pour des conditions de surface généralisées. Il est également possible de générer des fichiers contenant des informations détaillées sur les distributions de vitesse et de direction du

vent qui sont directement compatibles avec le logiciel WAsP (Mortensen et al, 2007), outil standard de l'industrie éolienne pour les calculs d'évaluation des ressources des sites.

Une étude d'atlas éolien numérique comporte deux parties : (i) Le travail de modélisation numérique lui-même et (ii) l'étude de vérification destinée à déterminer la validité et l'incertitude probable des résultats obtenus par l'atlas éolien numérique.

Cette section commence par une description de la modélisation numérique, puis traite des résultats de l'analyse des récents relevés éoliens effectués au cours de ce projet.

### 3.2 Description du modèle

Le KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model, Modèle atmosphérique à méso-échelle de Karlsruhe) est un modèle à échelle moyenne en 3D, non hydrostatique et incompressible. Il est décrit dans Adrian et Fiedler (1991) et Adrian (1994). Des dérivées spatiales sont calculées dans le modèle par des différences centrales sur un quadrillage suivant le relief. Les flux turbulents sont modélisés à l'aide d'un modèle de longueur de mélange avec des coefficients de diffusion turbulente dépendant de la stabilité dans un flux stratifié régulièrement et une fermeture non locale pour la couche mixte convective. Les conditions limites latérales s'appuient sur l'hypothèse d'une valeur normale des gradients nulle pour les flux entrants. S'agissant des limites de flux sortants, les équations horizontales de mouvement sont remplacées par une équation d'onde simple permettant la propagation de signaux vers l'extérieur du domaine sans effet de reflet. Des ondes de gravité peuvent pénétrer la frontière supérieure vers l'extérieur, en utilisant la condition radiative limite de Klemp et Durran (1983).

KAMM peut fonctionner comme un modèle « autonome », c'est-à-dire qu'il peut être utilisé avec le seul forçage à grande échelle sous la forme d'un profil vertical unique de vent géostrophique et de température potentielle virtuelle. Il n'est donc pas nécessaire d'incorporer le modèle à moyenne échelle dans un modèle plus grand fournissant les conditions limites. Aux échelles régionales, le modèle à moyenne échelle est utilisé pour modéliser des flux atmosphériques dans des domaines d'une taille de 100 à 1000 km x 100 à 1000 km, avec une résolution horizontale typique de 2,5 km à 10 km.

A la verticale, le modèle s'étend du niveau de la mer à 5 500 m au-dessus du niveau de la mer, en utilisant 25 niveaux de modèle et un système de coordonnées suivant le relief. L'intervalle entre les niveaux verticaux n'est pas uniforme. Cela permet de disposer de niveaux de modélisation verticale plus rapprochés à proximité du relief. Les cinq premiers niveaux de modélisation sont 0 m, 20,3 m, 58,7 m, 115,3 m et 190,0 m au-dessus de la surface. L'écartement entre ces niveaux est plus faible quand le relief est élevé.

La Figure 3.1 présente l'élévation du terrain pour les domaines de modélisation utilisés pour cette étude d'atlas éolien numérique. Les données d'élévation par rapport à la surface sont dérivées de la version 2 de l'ensemble de données de la Mission de cartographie radar de la Terre (STRM30) de la NASA. L'ensemble de données est accessible sur la page Web de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, Agence nationale (américaine) de l'aéronautique et de l'espace) (Lien Internet [1]). Ces données utilisent une projection longitude/latitude à une résolution de 30 secondes d'arc. Ces données d'élévation sont manipulées d'abord pour les convertir à un système de coordonnées UTM, puis pour modifier le système de coordonnées et la résolution de manière à permettre des simulations à échelle moyenne.

Les données de longueur de rugosité de surface aérodynamique dérivent de la Classification GLCC globale de la couverture terrestre de l'USGS (United States Geological Survey, Commission géologique

des Etats-Unis). Les données sont accessibles sur la page Web de l'USGS (Lien internet [2]). Par le moyen d'une table de consultation, les types d'affectation des terrains ont été convertis en longueurs de rugosité de surface aérodynamiques. Ces données de rugosité sont manipulées d'abord pour les convertir à un système de coordonnées UTM, puis pour modifier le système de coordonnées et la résolution de manière à permettre des simulations à échelle moyenne. La carte de rugosité de surface pour les domaines de modélisation à échelle moyenne est présentée à la Figure 3.2.

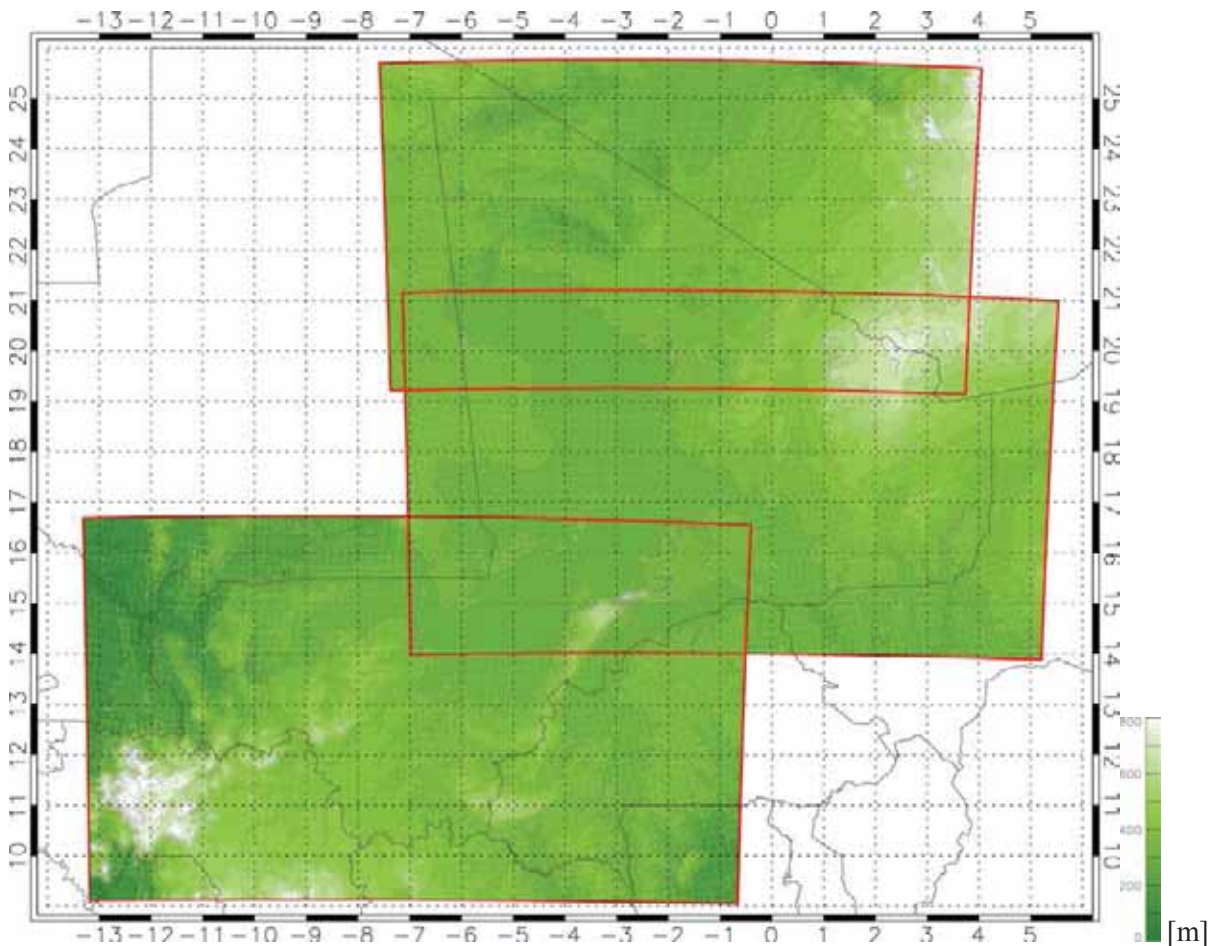


Figure 3.1 : L'élévation de surface sur les trois domaines de calcul utilisés pour la modélisation à échelle moyenne KAMM à une résolution de 7,5 km pour les domaines du nord du Mali, du centre du Mali et du sud du Mali, matérialisés par les lignes rouges de périmètre des domaines. L'intervalle entre les courbes de niveau est de 100 m. Les axes x et y correspondent à la longitude et la latitude. Les données sont dérivées de la version 2 de l'ensemble de données de la Mission de cartographie radar de la Terre (STRM) de la NASA.

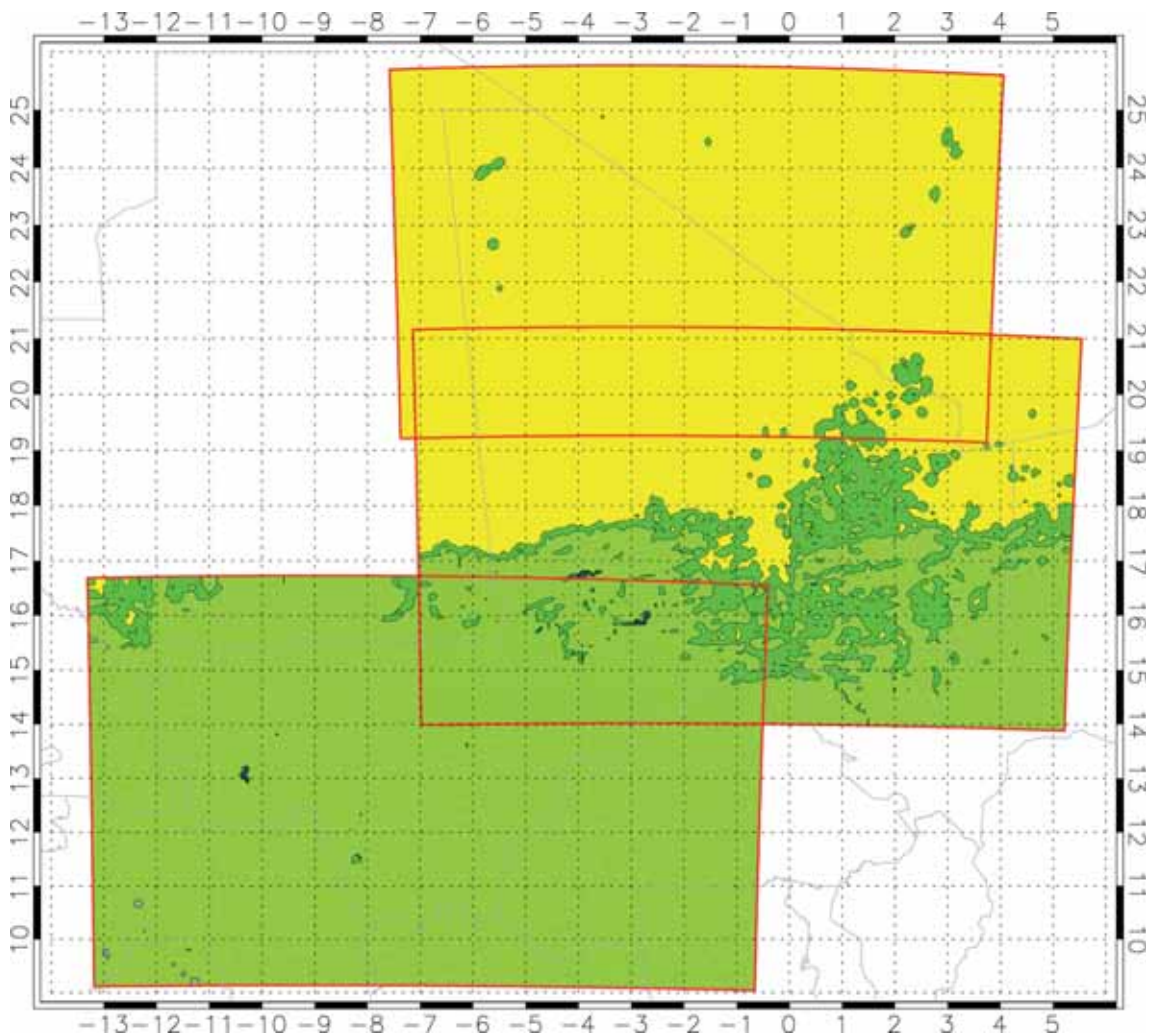


Figure 3.2 : La longueur de rugosité aérodynamique de surface pour les trois domaines de modélisation à une résolution de 7,5 km. Les limites des domaines sont matérialisées par les lignes rouges. Les axes  $x$  et  $y$  correspondent à la longitude et à la latitude, comme dans la figure 1.1. Légende : Bleu  $z_0 = 0,0002$  m, jaune  $0,0002 < z_0 < 0,002$  m, vert vif  $0,002 < z_0 < 0,020$  m, vert  $0,020 < z_0 < 0,2$  m, gris  $0,2 < z_0 < 0,60$  m. Les données de rugosité sont dérivées de la Classification GLCC globale de la couverture terrestre de l'USGS (United States Geological Survey, Commission géologique des Etats-Unis).

### 3.3 Données météorologiques initiales

Les données atmosphériques utilisées pour initialiser la modélisation sont extraites de l'ensemble de données de réanalyse NCEP/NCAR sur un quadrillage longitude/latitude avec une résolution de  $2,5 \times 2,5$  degrés (Kalnay et al, 1996). Les données peuvent être téléchargées sur Internet (Lien internet [3]).

Les données de hauteur géopotentielle, de température et d'humidité des surfaces isobariques 1 000 hPa, 850 hPa, 700 hPa et 500 hPa sont utilisées. Ces données sont converties en valeurs de vent géostrophique et de température potentielle virtuelle pour des hauteurs de 0 m, 1 500 m, 3 000 m et 5 500 m au-dessus du niveau de la mer. Les données sont compilées dans des séries temporelles de



30 ans, couvrant la période 1977-2006, pour être utilisées dans les programmes de génération de classes de vent.

### 3.4 Système de classification

Les données de série temporelle correspondant aux profils de vent et de température dérivées des données de réanalyse NCEP/NCAR sont utilisées pour déterminer trois ensembles de classes de vent. Un ensemble par domaine de modélisation.

Ces ensembles de classes de vent constituent des ensembles représentatifs des conditions éoliennes de la région étudiée. Les classes de vent représentent différentes vitesses de vent, directions du vent et stabilités atmosphériques.

Pour chaque classe de vent, un profil de classe de vent est défini. Les profils de classe de vent décrivent les variations de vitesse du vent géostrophique, de la direction du vent, de la température et de l'humidité avec l'altitude, de 0 m au point le plus élevé du modèle, à 5 500 m pour chaque classe de vent. Les profils de classe de vent peuvent être définis à l'aide de l'ensemble des données de la période 1977-2006 pour obtenir des profils de classe de vent annuels.

Le nombre de Froude est utilisé pour évaluer l'impact probable d'un obstacle, par exemple une colline, sur l'écoulement de l'air. Le nombre de Froude est  $U / (h * N)$ , avec  $U$  l'échelle de vitesse,  $h$  l'échelle de hauteur de l'obstacle,  $N^2$  la fréquence de Brunt-Väisälä, avec  $N^2 = (g/\theta_0)(d\theta/dz)$ ,  $(d\theta/dz)$  étant le gradient vertical de la température potentielle.

Lorsque le nombre de Froude est inférieur à un, l'air tend à s'écouler autour des obstacles. Des conditions plus stables ont tendance à avoir pour effet un comportement d'écoulement correspondant à un nombre de Froude plus bas, dans lequel l'écoulement entre ou autour des obstacles est plus fréquent, et les effets de côté sous le vent sont plus persistants.

L'inverse du carré du nombre de Froude est utilisé dans le système de classification des classes de vent pour différencier les situations météorologiques dans lesquelles la vitesse et la direction du vent sont similaires, mais la stratification thermique est différente. L'échelle de hauteur utilisée est de 1 500 m, soit l'écart de hauteur entre le premier et le deuxième niveau du profil de classe de vent.

Les trois ensembles de classes de vent utilisés pour cette étude d'atlas éolien numérique sont présentés dans la Figure 3.3. Les illustrations indiquent les vitesses et directions du vent, les inverses du carré du nombre de Froude et les fréquences d'occurrence de chaque classe de vent. On peut voir à la Figure 3.3 que beaucoup de classes de vent se présentent par paires, c'est-à-dire que pour des vitesses et directions de vent similaires, deux classes de vent coexistent, avec des nombres de Froude différents. Les différences de nombre de Froude correspondent aux différents profils verticaux de température des classes de vent.

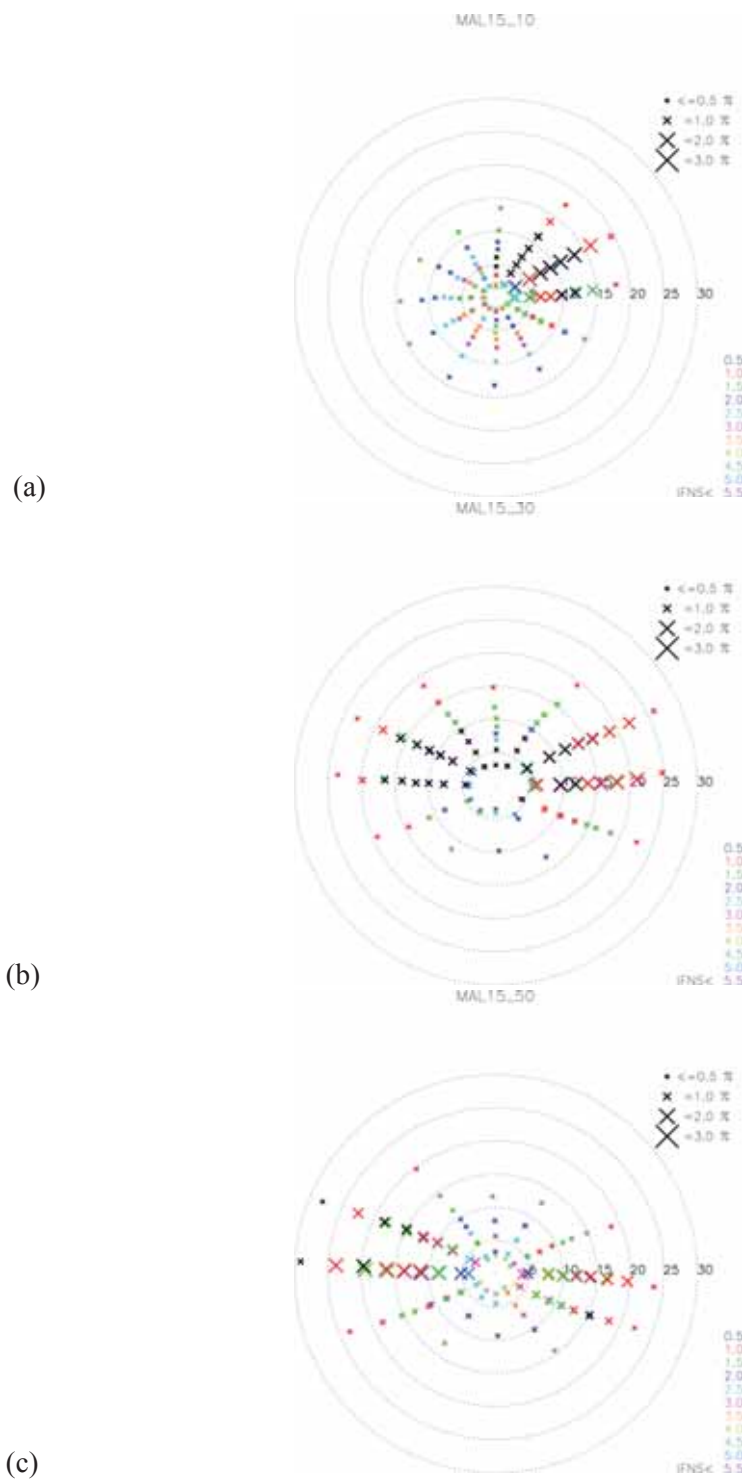


Figure 3.3 : Les trois ensembles de classes de vent géostrophiques pour (a) le nord du Mali, (b) le centre du Mali et (c) le sud du Mali reposent sur des données collectées au cours de la période 1977-2006. Chaque croix représente une vitesse de vent de forçage (distance à partir du centre du graphique) et sa direction. La vitesse est indiquée en m/s. La taille de chaque croix représente la probabilité de la classe de vent. L'échelle de fréquence est indiquée dans l'angle supérieur droit. La légende des couleurs indicatives de l'inverse du carré du nombre de Froude (IFNS) est présentée dans l'angle inférieur droit.

### 3.5 Traitement a posteriori

Une fois que les simulations à échelle moyenne sont terminées, les résultats sont compilés au cours de l'étape de traitement a posteriori de la méthodologie. Dans un premier temps, une moyenne pondérée des vitesses du vent est calculée à chaque point du quadrillage du modèle à échelle moyenne. Les pondérations de chaque simulation de classe de vent dépendent des fréquences d'occurrence. Cette étape de calcul de moyennes produit une carte de ressources simulée. Ensuite, pour chaque simulation de classe de vent, les effets des variations d'élévation et de rugosité sont éliminés à l'aide de modules similaires à ceux du logiciel WAsP. Enfin, on calcule la moyenne pondérée du résultat ajusté des simulations de vent. On obtient une carte d'atlas éolien ou une carte généralisée des vents pour une condition de surface plate d'une rugosité définie.

La Figure 3.4 est une représentation schématique des simulations de classes de vent et des étapes de traitement a posteriori.

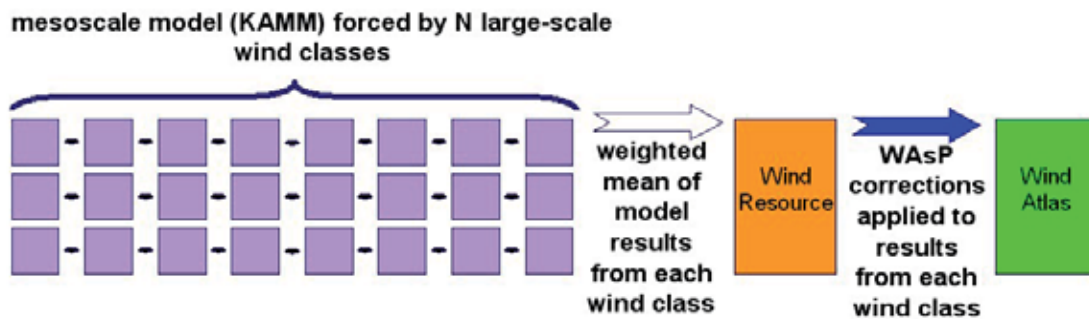


Figure 3.4 : Représentation schématique de la méthodologie d'atlas éolien numérique KAMM/WAsP. Dans cette étude d'atlas éolien numérique,  $N$ , le nombre de classes de vent, est égal à 136, 116 et 113 pour les différents domaines de calcul.

### 3.6 Résultats

Les résultats de l'étude d'atlas éolien numérique utilisant la méthodologie KAMM/WAsP peuvent être extraits et utilisés de deux manières très différentes. L'une d'elles consiste à présenter les résultats sous la forme de cartes de ressources, créées de la manière décrite plus haut. Ces cartes constituent un bon moyen de résumer le grand nombre de données générées dans le cadre de l'étude. Une autre manière d'exploiter les résultats consiste à créer des fichiers de climat éolien généralisé sous WAsP, appelés *.lib-files*, parce que l'extension utilisée par convention pour les noms de ces fichiers est « .lib ».

Les fichiers WAsP de climat éolien généralisé peuvent être générés suivant la méthodologie KAMM/WAsP. Cela signifie que des informations complètes concernant la distribution de la vitesse et de la direction du vent pour différentes altitudes par rapport au niveau du sol et différentes longueurs de rugosité de surface peuvent être obtenues pour n'importe quel site dans la région concernée.

Des fichiers WAsP de climat éolien généralisé ont été générés sur un quadrillage respectant un espacement de 7,5 km pour la région étudiée. Tous les fichiers *.lib-files* sont fournis et un petit programme est aussi inclus pour aider à sélectionner le fichier *.lib-file* par des critères de longitude et de latitude du site concerné. La Section 3.9 décrit cette opération de manière plus détaillée.

La Figure 3.5 et la Figure 3.6 présentent la vitesse du vent et la densité de puissance moyenne annuelle simulée, respectivement, pour la région considérée à une altitude de 50 m au-dessus de la surface. Ces cartes donnent une impression sommaire de la répartition spatiale des ressources éoliennes.

Toutefois, pour chaque point de la carte, il ne faut pas s'attendre à ce que des relevés produisent la même vitesse moyenne du vent que celle indiquée par la carte. Cela s'explique par le fait que la carte a été créée à l'aide d'une description de surface appliquant une résolution de 7,5 km. En réalité, la surface sera pleine de détails d'élévation de surface et de rugosité de surface. Par exemple, des collines et des forêts, qui constituent, respectivement, des détails d'élévation et de rugosité de la surface, ne seront pas résolues.

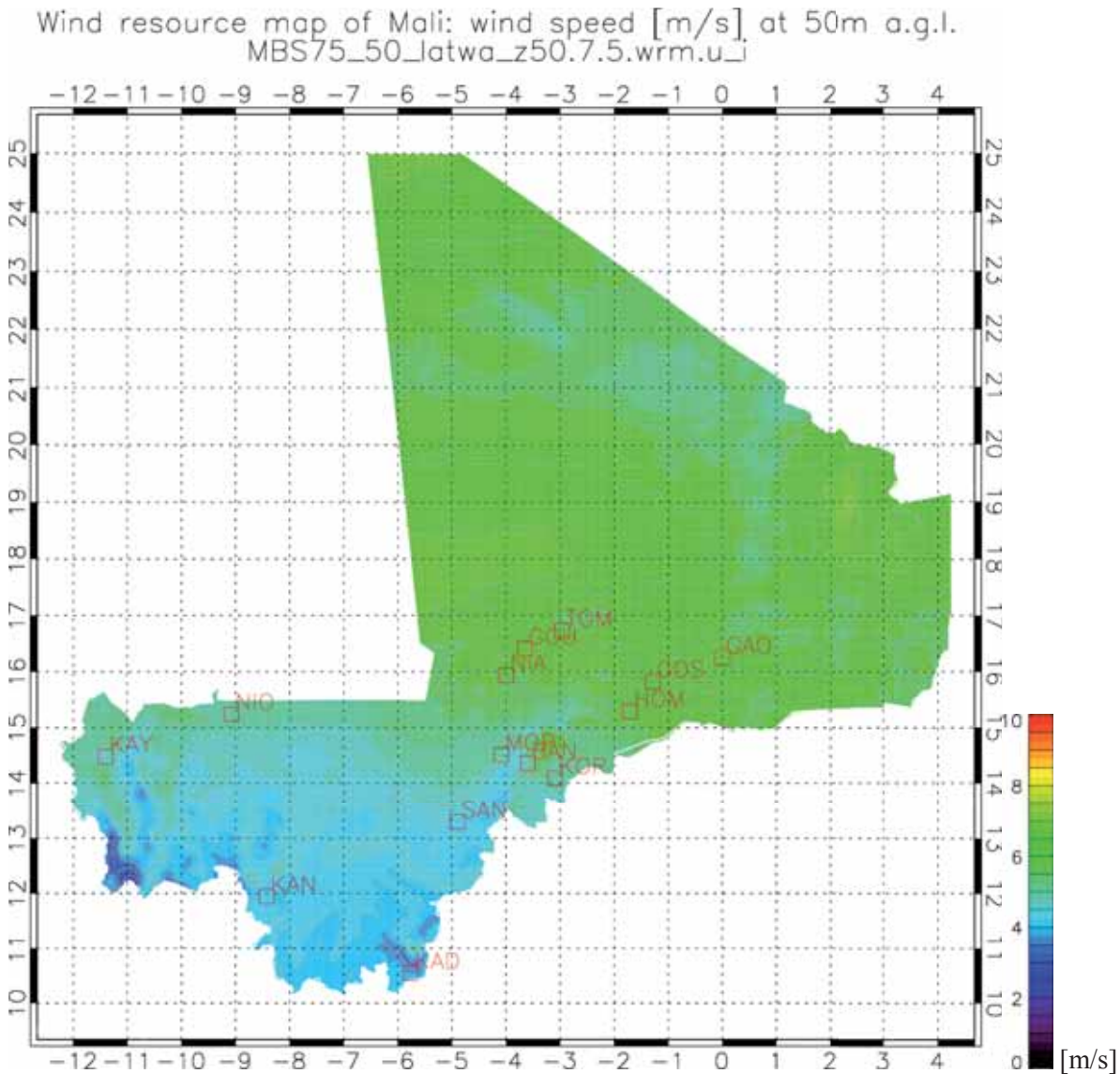


Figure 3.5 : Vitesse du vent moyenne annuelle simulée à 50 m au-dessus du niveau du sol. L'intervalle entre courbes est de 0,5 m/s et l'échelle des couleurs est indiquée en m/s. Les axes représentent les coordonnées de longitude et de latitude.



Wind resource map of Mali: wind power density [ $\text{W/m}^2$ ] at 50m a.g.l.  
MBS75\_50\_latwa\_z50.7.5.wrm.e\_l

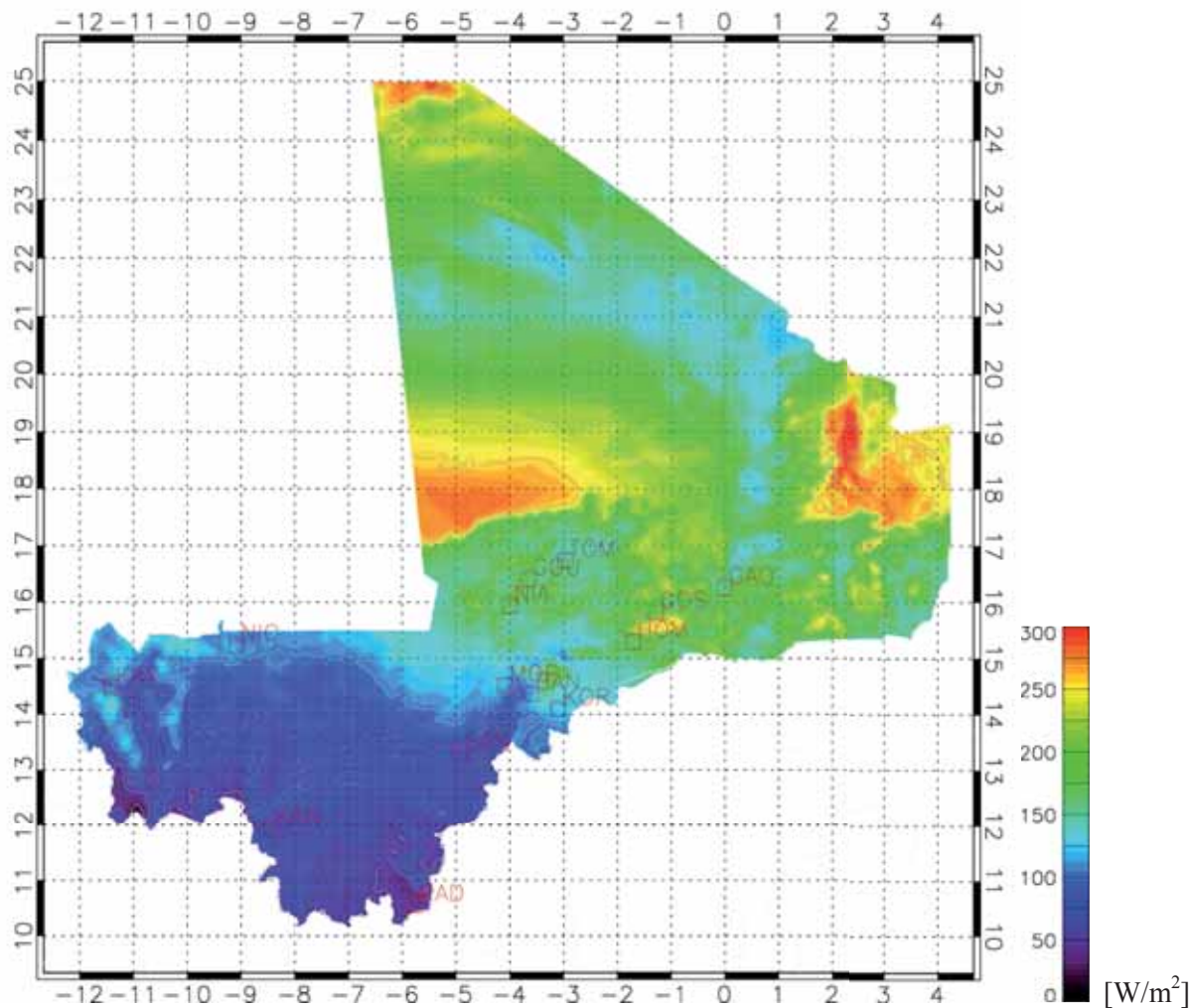


Figure 3.6 : Densité de puissance moyenne annuelle simulée du vent à 50 m au-dessus du niveau du sol. L'intervalle entre les courbes est de  $5 \text{ W/m}^2$  et l'échelle des couleurs est indiquée en  $\text{W/m}^2$ . Les axes correspondent aux coordonnées de longitude et de latitude.

La Figure 3.7 et la Figure 3.8 présentent respectivement la vitesse du vent moyenne annuelle généralisée et la densité de puissance moyenne annuelle généralisée. Ces cartes présentent la ressource après élimination des effets des variations résolues d'élévation de surface et de rugosité. Elles montrent ce que serait la vitesse moyenne annuelle du vent et la densité de puissance moyenne annuelle à 50 m au-dessus du niveau de la surface pour un terrain plat avec une rugosité uniforme de 0,03 m. Ces cartes sont utiles parce qu'elles montrent l'influence à une échelle moyenne sur la ressource éolienne, c'est-à-dire la variation de ressource due à d'autres phénomènes que l'accélération orographique locale et la variation de rugosité.

Wind atlas map of Mali: wind speed [m/s] at 50m a.g.l.  $z_0 = 0.03m$   
MBS75\_50\_latwa\_z50.7.5.wam.u\_i

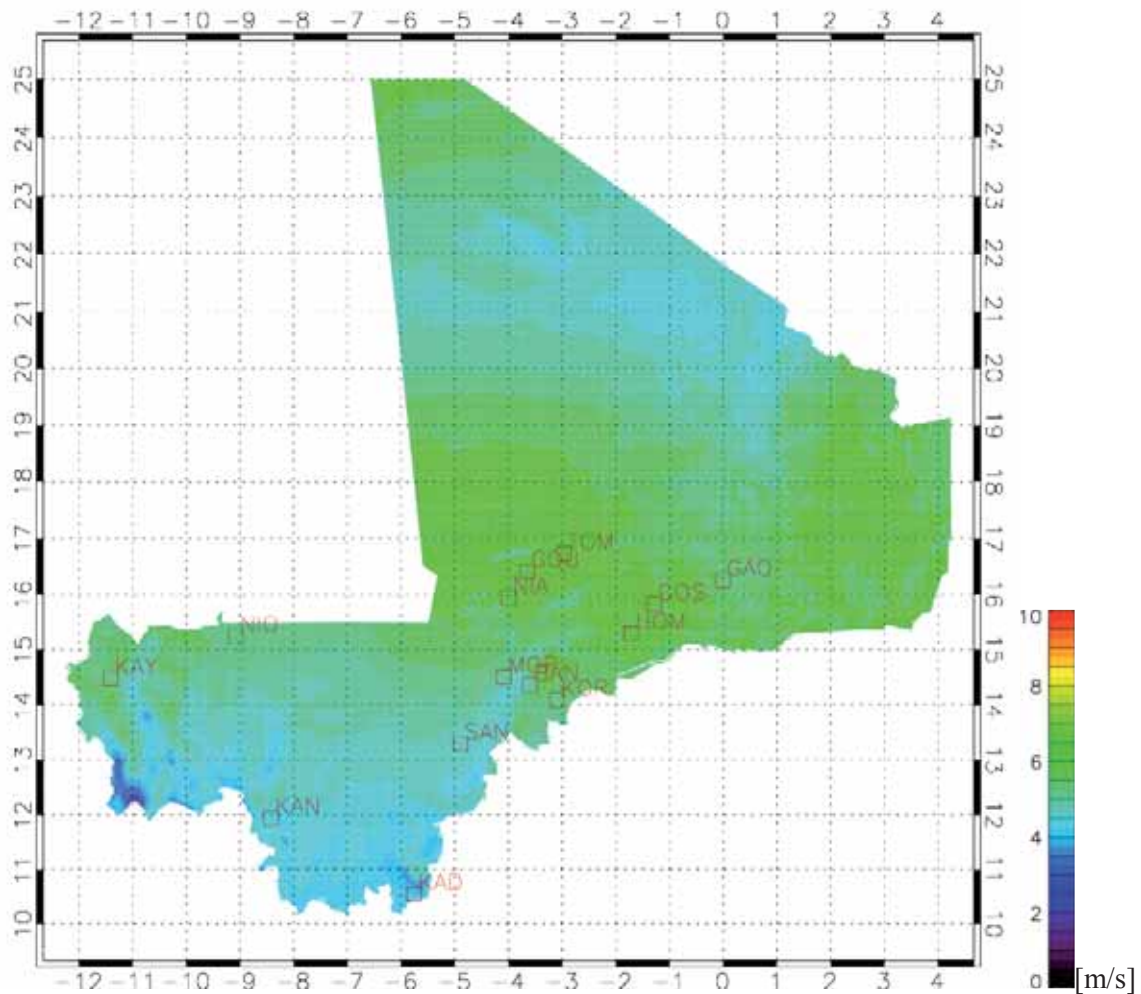


Figure 3.7 : Vitesse moyenne annuelle généralisée du vent à 50 m au-dessus du niveau de la surface pour une surface plate homogène avec une longueur de rugosité de 0,03 m. L'intervalle entre les courbes est de 0,5 m/s et la gradation des couleurs est en m/s. Les lignes grisées indiquent l'élévation de la surface, les frontières nationales et la côte. Les axes correspondent aux coordonnées de longitude et de latitude.

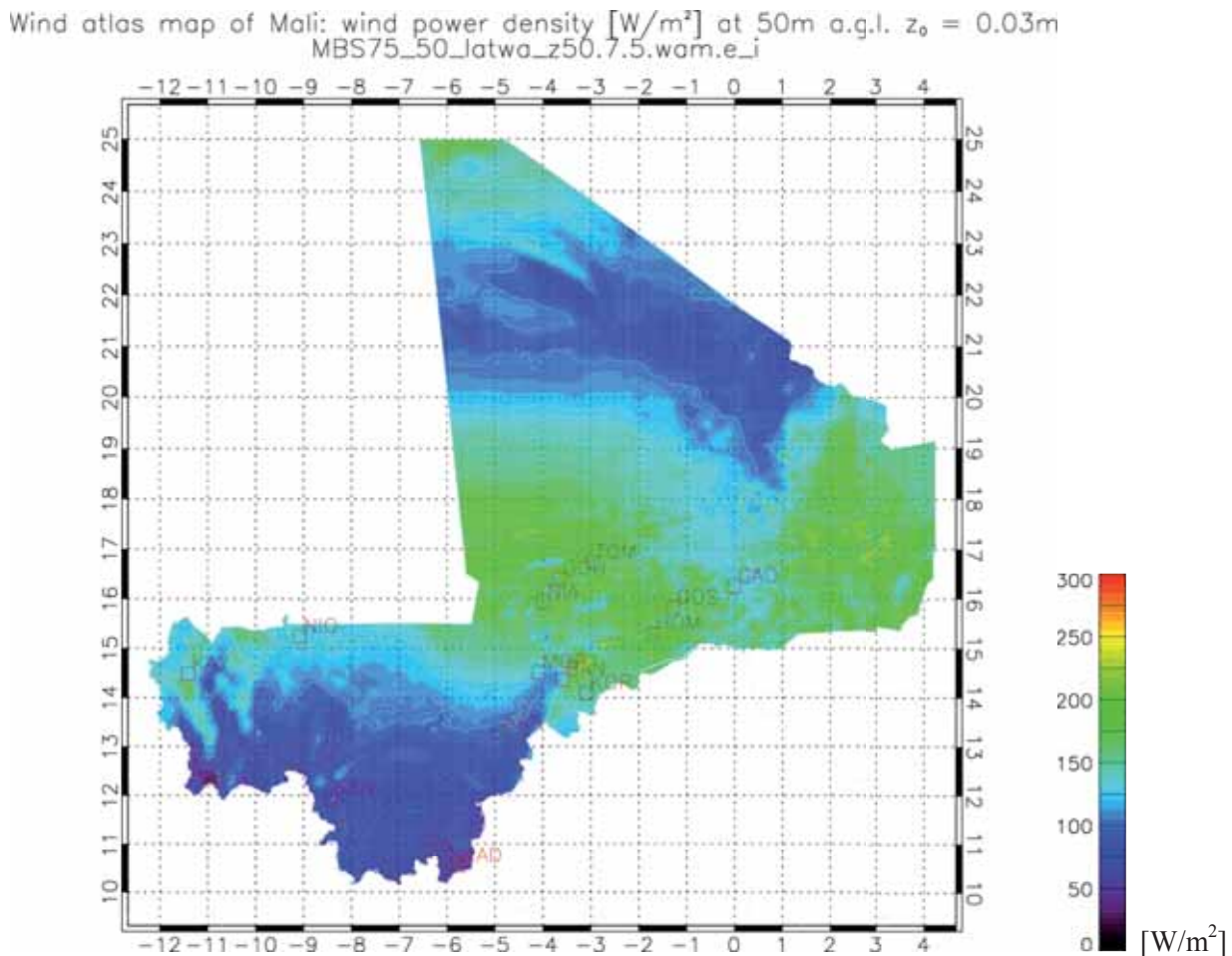


Figure 3.8 : Densité de puissance moyenne annuelle généralisée du vent à 50 m au-dessus du niveau de la surface pour une surface plate homogène avec une longueur de rugosité de 0,03 m. L'intervalle entre les courbes correspond à  $25 \text{ W}/\text{m}^2$  et la gradation des couleurs est en  $\text{W}/\text{m}^2$ . Les lignes grisées indiquent l'élévation par rapport à la surface, les frontières nationales et la côte. Les axes correspondent aux coordonnées de longitude et de latitude.

Selon les conditions locales, par ex. les conditions d'accès et les options de remplacement d'une électricité reposant sur le diesel, des vitesses du vent de 5 m/s sont généralement considérées comme constituant la limite inférieure pour une exploitation économiquement faisable des ressources éoliennes. Les résultats présentés à la Figure 3.5 indiquent, comme prévu, un potentiel de ressources éoliennes relativement faible ( $< 5 \text{ m}/\text{s}$ ) au Mali, surtout dans le sud et la partie la plus peuplée du pays, bien que certains sites exposés sur des crêtes orientées favorablement produisent des données moyennes plus élevées. Des vitesses du vent supérieures à 5 m/s prévalent dans la partie septentrionale du pays (au-dessus de 16 degrés de latitude), notamment dans des villes comme Tombouctou et Gao. On trouve aussi des vitesses moyennes du vent supérieures à 5 m/s plus au sud, sur le plateau dogon. Les sites bénéficiant d'un rayonnement favorable dans ces zones pourraient être prometteurs, s'ils sont combinés à des possibilités d'utilisation pratiques.

### 3.7 Erreur et incertitude

Nous présentons dans cette section les causes d'erreur et d'incertitude dans la méthodologie. L'incertitude ou les erreurs dans les résultats finals de la méthodologie d'atlas éolien numérique devraient être considérées comme faisant partie de l'étude. Chaque étape de la méthodologie implique des approximations et des incertitudes ; en conséquence, l'estimation de l'incertitude finale doit considérer comment chaque étape peut contribuer à l'incertitude et caractériser l'impact de l'erreur.

Les facteurs contribuant aux erreurs peuvent comprendre :

- Description des conditions météorologiques à grande échelle provenant de la réanalyse NCEP/NCAR.
  - La réanalyse internationale NCEP/NCAR utilise une résolution assez grossière et son exactitude est meilleure dans des régions à forte densité d'observations. Dans les régions où les relevés sont plus espacés, l'exactitude est dégradée.
  - Des erreurs de vitesse du vent peuvent entraîner directement des erreurs dans l'estimation des ressources éoliennes
  - Des erreurs de profils de température entraîneront des erreurs de stabilité et du nombre de Froude et peuvent donner lieu à des comportements d'écoulement erronés en présence d'un relief complexe.
- La détermination de la classe de vent et les profils verticaux associés de vent géostrophique et de température.
  - La répartition d'une grande quantité de données atmosphériques en environ 120 classes de vent est un moyen de réduire la puissance de calcul nécessaire pour exécuter les simulations à échelle moyenne. Ce faisant, il est possible que de nouvelles erreurs se glissent dans la procédure. Quel que soit le soin apporté à l'élaboration de la méthode de détermination des classes de vent pour minimiser cette erreur.
  - Il est impératif de procéder à certains choix concernant les propriétés des classes de vent. Par exemple, à quelle hauteur le vent géostrophique doit-il être utilisé pour définir les classes de vent ? Une sélection soignée et pertinente de ces propriétés minimise les erreurs liées à cette étape.
- Description de l'élévation par rapport à la surface
  - Les erreurs d'élévation par rapport à la surface peuvent survenir en raison de l'insuffisance de la résolution spatiale. L'une des conséquences les plus graves d'une erreur dans l'orographie est la sous-représentation des reliefs élevés. Par exemple, la hauteur des pics est réduite lorsqu'une résolution plus faible est utilisée. Cela peut entraîner une inexactitude de l'interaction des flux avec le relief.
  -
- Description de la rugosité de surface
  - Les erreurs de rugosité de surface peuvent résulter de l'insuffisance de la résolution spatiale et d'inexactitudes dans l'estimation de la longueur de la rugosité.
- Modélisation à échelle moyenne
  - Les vents de nature thermique, comme les brises marines, sont réputés pour être difficiles à reproduire dans le modèle à échelle moyenne. Comme les températures des surfaces terrestres et maritimes sont maintenues fixes dans le temps pour chaque classe de vent, il est prévu que l'évolution de ces phénomènes éoliens ne sera pas très bien reproduite.

- La modélisation KAMM suppose un forçage atmosphérique uniforme et régulier ; ainsi, toute caractéristique éolienne due à des forçages transitoires et variables dans l'espace est reproduite imparfaitement.
- Modélisation à micro-échelle
  - En tenant compte des variations locales à échelle moyenne des caractéristiques de variation d'accélération orographique et de rugosité, il est possible de transformer les caractéristiques de vent simulées en caractéristiques de vent généralisées (fichiers *.lib-files* sous WAsP). Cette procédure peut introduire des incertitudes dans les statistiques de vent généralisées.

### 3.8 Vérification

Dans la section précédente, nous exposons les causes d'erreurs et d'incertitudes. Dans cette section, ces erreurs ou incertitudes sont évaluées. Comme pour la plupart des données modélisées de manière générale, il est utile de vérifier les résultats par des relevés afin d'évaluer l'erreur ou l'incertitude liée aux résultats du modèle. La procédure standard à suivre pour les résultats KAMM/WAsP consiste à comparer les statistiques de climat éolien généralisées obtenues avec KAMM/WAsP et résultant de l'analyse WAsP des données des relevés à des points de relevé précis. Le processus de vérification est en fait un processus itératif, dans lequel le paramétrage du système du modèle est modifié jusqu'à ce que la configuration optimale du système de modèle soit obtenue en minimisant la différence entre résultats de la modélisation et relevés.

*Tableau 3.1 : Tableau indiquant l'emplacement des mâts de relevé dans les domaines de modélisation à échelle moyenne utilisés pour l'atlas éolien numérique. On peut voir qu'aucune station ne se trouve dans le domaine septentrional (MBN). On peut aussi constater que certaines stations se situent dans la région de chevauchement entre les domaines central et méridional (MBC et MBS). Dans ces cas, la mention « Y1 » signale le domaine qui donne les meilleurs résultats pour l'atlas éolien numérique et « Y2 » les résultats de moindre qualité. Les résultats de moindre qualité résultent de l'implantation du mât de relevé à proximité du bord du domaine. Pour GOS et HOM, où aucune vérification n'a été effectuée, l'on s'attend à ce que le domaine MBC fournisse le meilleur résultat.*

Site	Code du mât	Domaine(s) de modélisation à échelle moyenne		
		MBN	MBC	MBS
<b>Tombouctou</b>	TOM	-	Y	-
<b>Niafunké</b>	NIA	-	Y1	Y2
<b>Goundam</b>	GOU	-	Y1	Y2
<b>Gossi</b>	GOS	-	Y1	Y2
<b>Mopti/Sévaré</b>	MOP	-	Y	Y
<b>Hombori</b>	HOM	-	Y1	Y2
<b>Bandiagara</b>	BAN	-	Y2	Y1
<b>Koro</b>	KOR	-	-	Y
<b>Gao</b>	GAO	-	Y	
<b>San</b>	SAN	-	-	Y
<b>Nioro</b>	NIO	-	-	Y
<b>Kayes</b>	KAY	-	-	Y
<b>Kangaba</b>	KAN	-	-	Y
<b>Kadiolo</b>	KAD	-	-	Y



La Section 2 décrit le processus d'obtention de climats éoliens généralisés à partir de relevés. Un problème doit être résolu en priorité : les périodes de relevé n'avaient qu'une durée d'un an. Cela ne représente pas une période climatologique, ni la période sur laquelle se fondent les résultats de l'atlas éolien numérique. Pour résoudre ce problème, les résultats de l'atlas éolien numérique sont recalculés par détermination des pondérations des classes de vent pour les périodes de relevé effectivement utilisées.

La Figure 3.9 présente la variation des vents de forçage à grande échelle pour les trois domaines de modélisation à échelle moyenne. On peut voir que la moyenne des vents de forçage à grande échelle de la période climatologique est légèrement supérieure aux vents de forçage à grande échelle des périodes de relevé. Ainsi, nous nous attendrions à une légère sous-estimation d'un climat éolien climatologique s'il reposait sur la seule période de relevé. Toutefois, la différence entre période climatologique et de relevé est prise en compte. Nous ne nous attendons donc pas à ce que cet effet provoque une distorsion dans le résultat final. Le Tableau 3.1 présente la distribution des stations de relevé dans les différents domaines de modélisation.

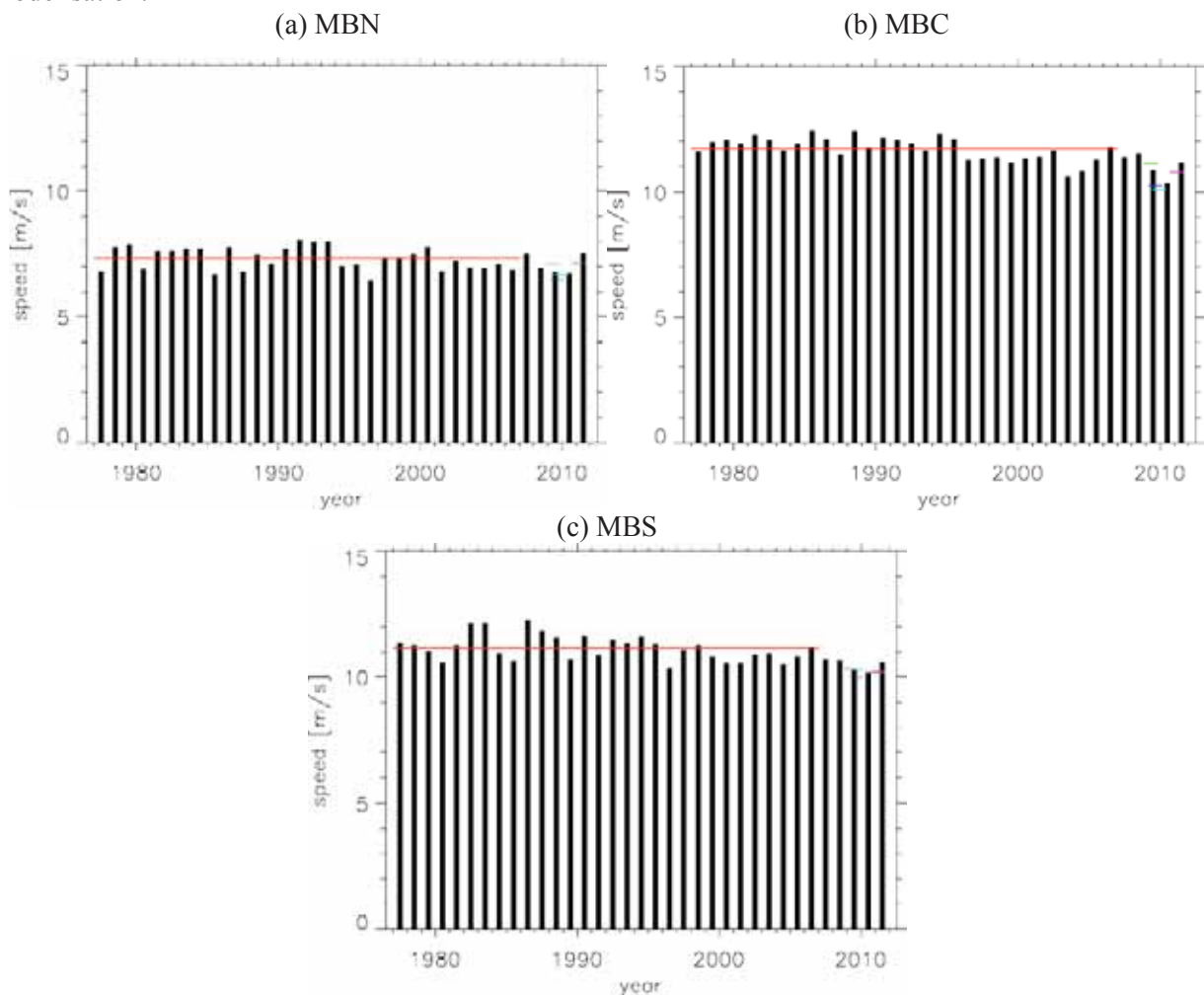
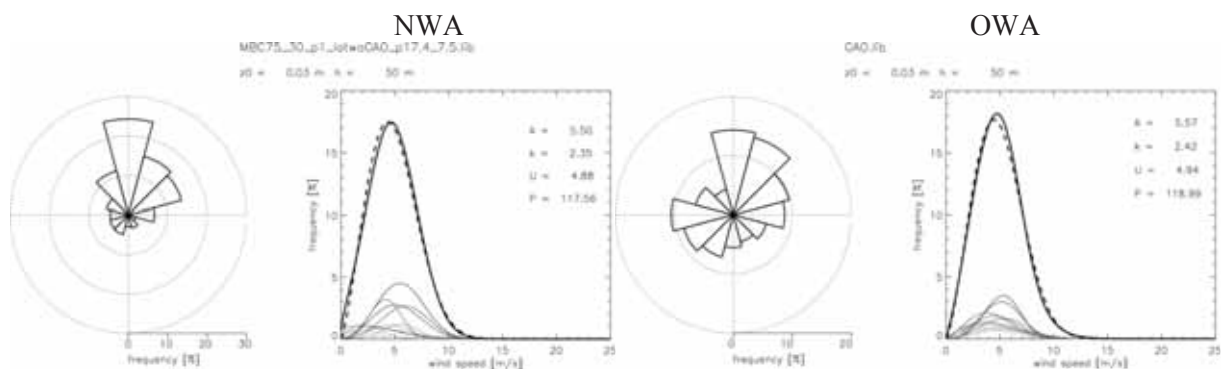


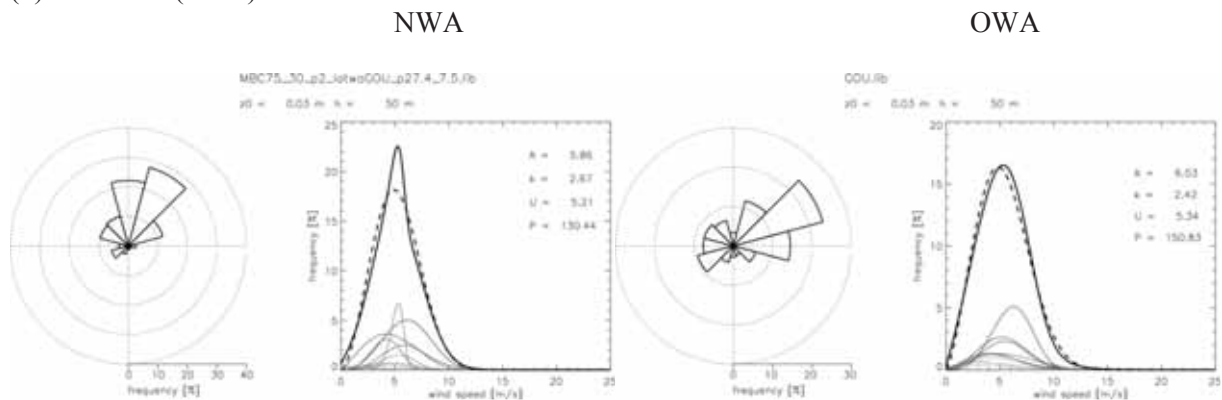
Figure 3.9 : Graphiques présentant la vitesse annuelle moyenne du vent géostrophique pour les trois domaines de modélisation à échelle moyenne, à savoir (a) le domaine septentrional, MBN, (b) le domaine central, MBC et (c) le domaine méridional, MBS, pour les années comprises entre 1977 et 2011. La ligne rouge indique la moyenne de la période 1977-2006, qui est la période pour laquelle est calculée la climatologie de l'atlas éolien. Les autres lignes colorées courtes indiquent la moyenne de quatre périodes de relevé d'un an utilisées et identifiées dans le Tableau 2.3.

Pour tenir compte de la différence de période climatologique et de relevé et effectuer une comparaison correcte du climat éolien généralisé des sites, les pondérations des classes de vent sont recalculées pour la période de relevé et un nouveau traitement a posteriori est effectué. Le résultat est constitué par les climats éoliens généralisés présentés sur le côté gauche de la Figure 3.10 et la Figure 3.11. Ils peuvent être comparés aux climats éoliens généralisés dérivés des observations présentés dans la partie droite de la Figure 3.10 et de la Figure 3.11.

(a) Gao (GAO)



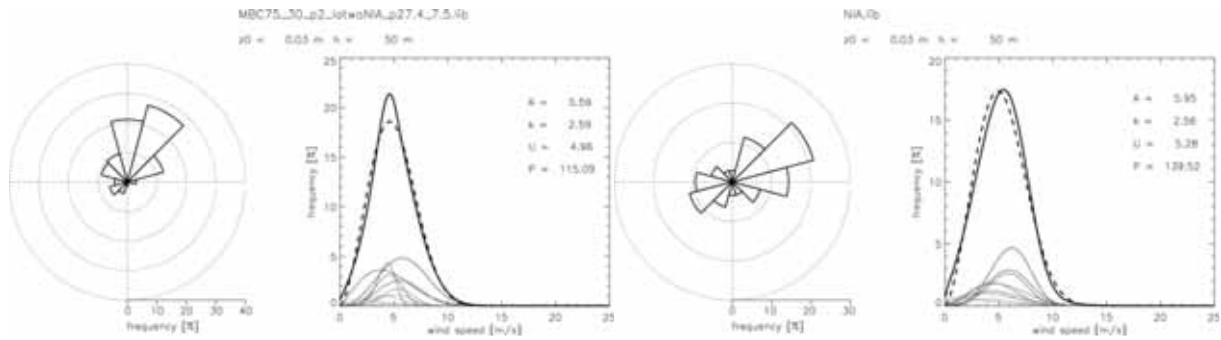
(b) Goundam (GOU)



(c) Niafunké (NIA)

NWA

OWA



(d) Tombouctou (TOM)

NWA

OWA

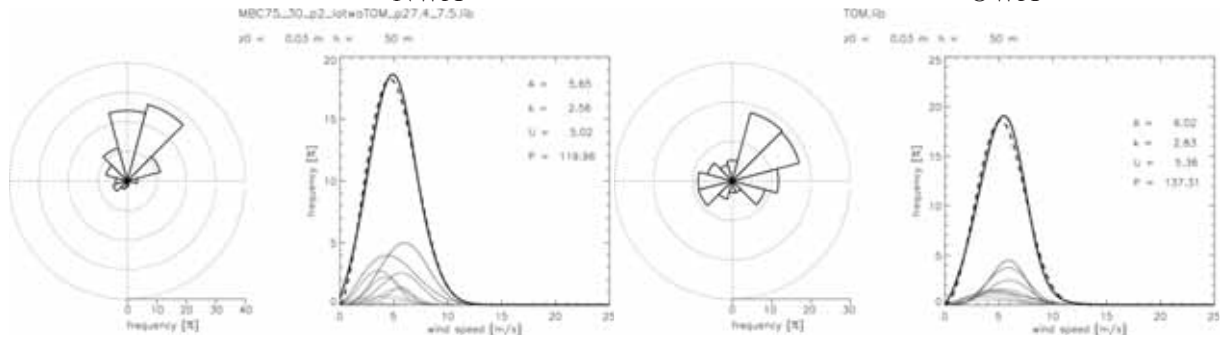
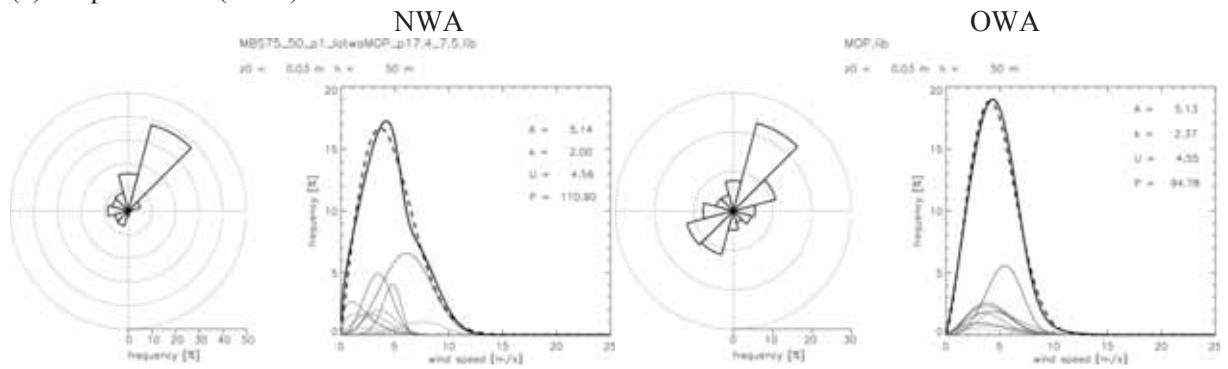


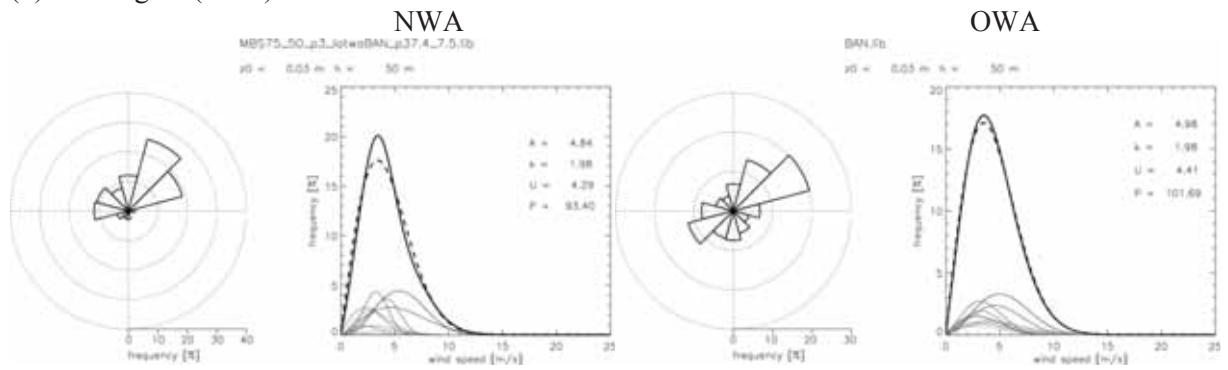
Figure 3.10 : Comparaison des valeurs généralisées du climat éolien de l'atlas éolien numérique (NWA, Numerical wind atlas) (à gauche) et de l'atlas éolien observationnel (OWA, Observation wind atlas) (à droite) calculées pour les sites des relevés à 50 m dans le domaine central (MBC) pour des conditions standard, un terrain plat et une longueur de rugosité homogène de 3 cm. Les tracés en rose des vents indiquent la distribution de la fréquence de direction, tandis que le graphique en ligne indique les distributions de vitesse du vent. Les lignes grisées indiquent les distributions de vitesse du vent pour différents secteurs de directions. La ligne continue grasse indique la distribution de la vitesse du vent émergent, c'est-à-dire la somme des distributions par secteur. La ligne discontinue grasse indique les distributions de Weibull du total des distributions de vitesse du vent. Les valeurs imprimées donnent, pour la distribution totale de la vitesse du vent, les paramètres d'échelle ( $A$ ) et de forme ( $k$ ) de Weibull, la vitesse moyenne annuelle du vent ( $u$ ) en m/s et la densité de l'électricité ( $P$ ) en W/m<sup>2</sup>.



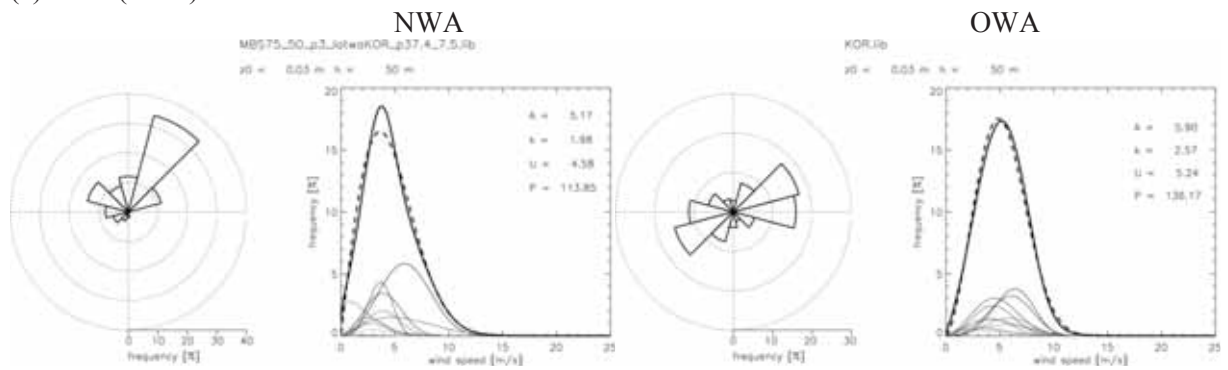
(a) Mopti/Sévaré (MOP)



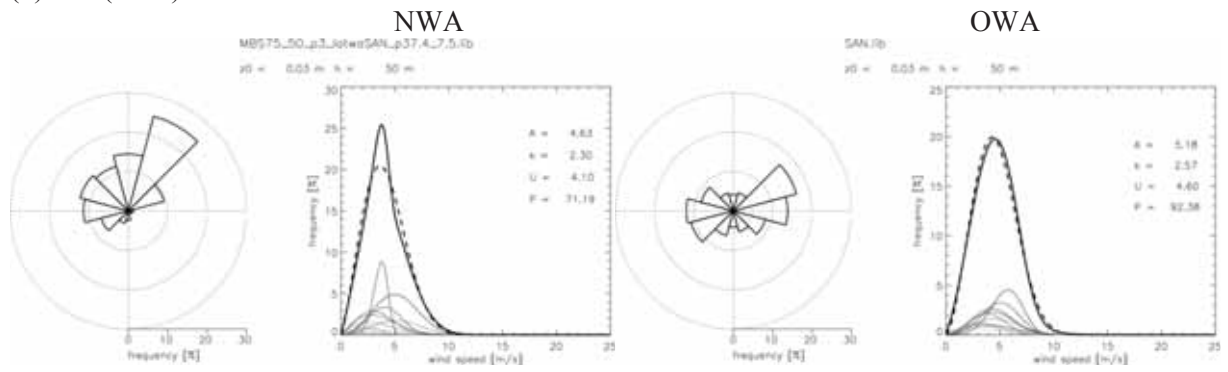
(b) Bandiagara (BAN)



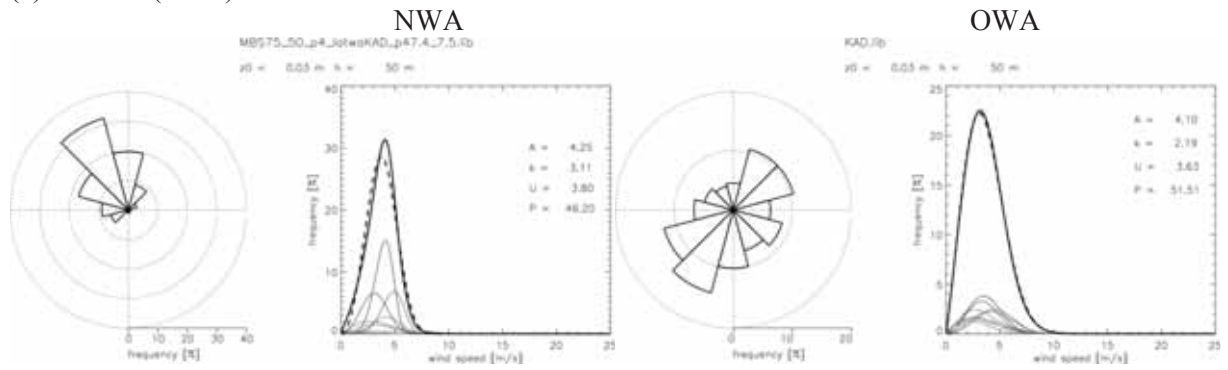
(c) Koro (KOR)



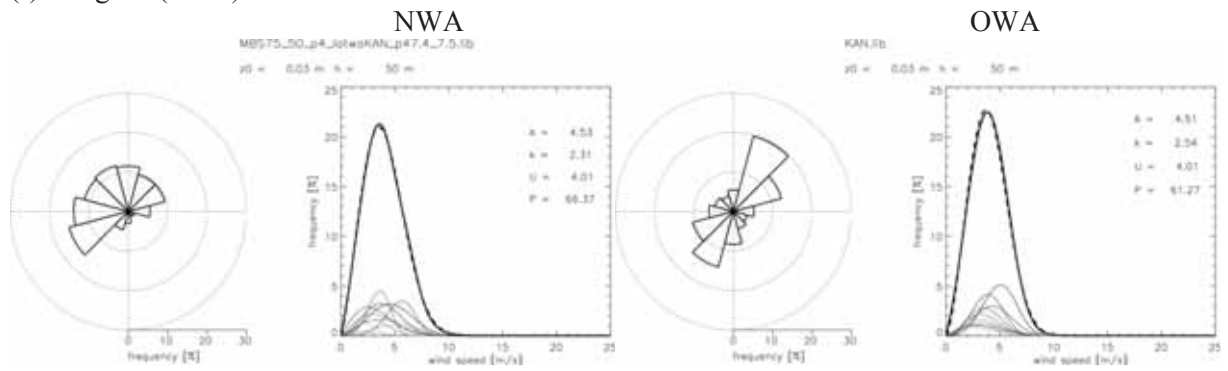
(d) San (SAN)



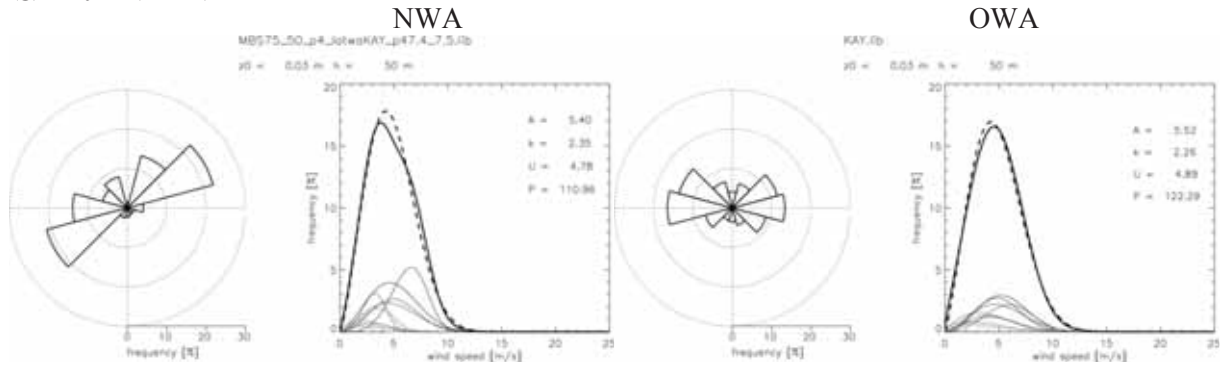
(e) Kadiolo (KAD)



(f) Kangaba (KAN)



(g) Kayes (KAY)



(h) Nioro (NIO)

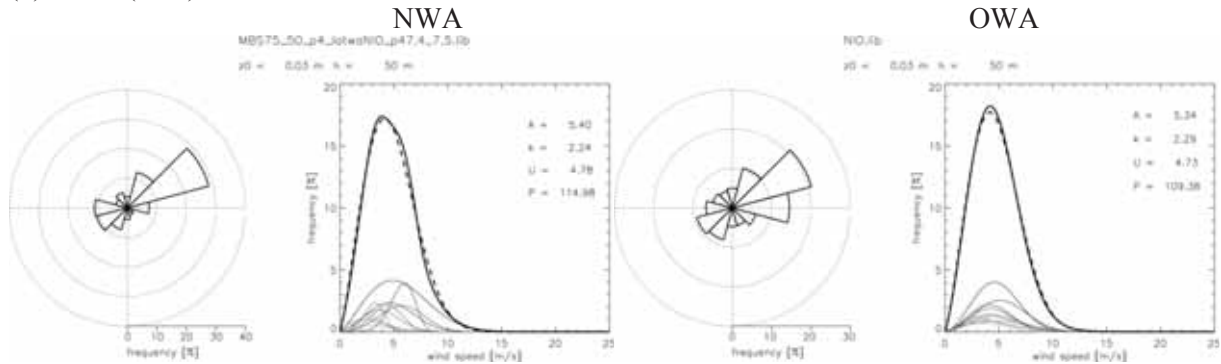


Figure 3.11: Comparaison des valeurs généralisées du climat éolien de l'atlas éolien numérique (NWA, Numerical wind atlas) (à gauche) et de l'atlas éolien observationnel (OWA, Observation wind atlas) (à droite) calculées pour les sites des relevés à 50 m dans le domaine méridional (MBS) pour des conditions standard, un terrain plat et une longueur de rugosité homogène de 3 cm. Les tracés en rose des vents indiquent la distribution de la fréquence de direction, tandis que le graphique en ligne indique les distributions de vitesse du vent. Les lignes grisées indiquent les distributions de vitesse du vent pour différents secteurs de directions. La ligne continue grasse indique la distribution de la vitesse du vent émergent, c'est-à-dire la somme des distributions par secteur. La ligne discontinue grasse indique les distributions de Weibull du total des distributions de vitesse du vent. Les valeurs imprimées donnent, pour la distribution totale de la vitesse du vent, les paramètres d'échelle ( $A$ ) et de forme ( $k$ ) de Weibull, la vitesse moyenne annuelle du vent ( $u$ ) en m/s et la densité de l'électricité ( $P$ ) en  $W/m^2$ .

De manière générale, la concordance qualitative des distributions de la direction des vents (roses des vents) entre l'atlas éolien numérique et l'atlas éolien observationnel est bonne. La plus médiocre concordance des distributions de direction concerne Kadiolo. La vitesse moyenne du vent y est relativement faible et il est très souvent difficile de modéliser la direction des vents dans ce cas. Les résultats typiques de KAMM/WASP donnent des distributions de la direction des vents plus concentrées que les distributions des directions résultant des relevés (comme dans le cas de Mopti/Sévaré, MOP) et la direction dominante peut être déplacée d'un secteur directionnel (30 degrés) (comme dans le cas de Goundam, GOU et de Kayes, KAY, entre autres).

Une évaluation plus quantitative de l'atlas éolien numérique est proposée par comparaison de la vitesse moyenne du vent des climats généralisés pour les sites de relevé fondés sur l'atlas éolien numérique et l'atlas éolien observationnel. Le résumé de cette comparaison est présenté dans le Tableau 3.2. La différence relative ou l'erreur moyenne est de -3,3 % (une légère distorsion négative ou sous-estimation) et l'erreur absolue moyenne est de 4,3 %. Ces valeurs sont très proches des valeurs type obtenues pour des études de vérification dans d'autres projets. Les études antérieures de l'atlas éolien numérique utilisant la méthode KAMM/WAsP et employant la vérification ont démontré l'incertitude des vitesses du vent à 50 m au-dessus du niveau du sol comme étant comprise entre environ 5 % et 15 % (Badger et al, 2011, Mortensen et al, 2005 et Frank et al, 2001). La plus faible incertitude concernant un relief relativement simple et la valeur plus élevée correspondant à un relief complexe, c'est-à-dire zones et sites montagneux. Le Tableau 3.3 présente les statistiques de vérification, comme dans le Tableau 3.2, mais en utilisant plutôt l'anémomètre en position basse. Les caractéristiques d'erreur globale sont similaires à l'anémomètre en position haute. Les sites de relevé de Koro et de San sont ceux qui présentent les erreurs les plus marquées.

*Tableau 3.2 : Table de vérification comparant le vent moyen du climat éolien généralisé à 50 m aux sites de relevé identifiés, dérivé de l'atlas éolien observationnel (OWA), sur la base des anémomètres en position haute (40 m ou 50 m) et de l'atlas éolien numérique (NWA) pour une condition standard, un terrain plat ayant une rugosité homogène de 3 cm.*

Localisation	Code du mât	OWA [m/s]	NWA [m/s]	Différence [m/	Différence relative %	Différence absolue %	Configuration
<b>Bandiagara</b>	BAN	4,42	4,29	-0,13	-2,94	2,94	MBS
<b>Gao</b>	GAO	4,94	4,88	-0,06	-1,21	1,21	MBC
<b>Goundam</b>	GOU	5,34	5,21	-0,13	-2,43	2,43	MBC
<b>Kadiolo</b>	KAD	3,63	3,79	0,16	4,41	4,41	MBS
<b>Kangaba</b>	KAN	4,00	4,01	0,01	0,25	0,25	MBS
<b>Kayes</b>	KAY	4,89	4,78	-0,11	-2,25	2,25	MBS
<b>Koro</b>	KOR	5,24	4,59	-0,65	-12,40	12,40	MBS
<b>Mopti/Sévaré</b>	MOP	4,55	4,56	0,01	0,22	0,22	MBS
<b>Niafunké</b>	NIA	5,28	4,96	-0,32	-6,06	6,06	MBC
<b>Nioro</b>	NIO	4,73	4,78	0,05	1,06	1,06	MBS
<b>San</b>	SAN	4,60	4,10	-0,50	-10,87	10,87	MBS
<b>Tombouctou</b>	TOM	5,36	4,96	-0,40	-7,46	7,46	MBC
<b>Moyenne</b>					<b>-3,31</b>	<b>4,30</b>	

Tableau 3.3 : Table de vérification comparant le vent moyen du climat éolien généralisé à 50 m aux sites de relevé identifiés, dérivé de l’atlas éolien observationnel (OWA), sur la base des anémomètres en position basse (22 m ou 30 m) et de l’atlas éolien numérique (NWA) pour une condition standard, un terrain plat ayant une rugosité homogène de 3 cm.

Localisation	Code du mât	OWA [m/s]	NWA [m/s]	Différence [m/s]	Différence relative %	Différence absolue %	Configuration
<b>Bandiagara</b>	BAN	4,43	4,29	-0,14	-3,16	3,16	MBS
<b>Gao</b>	GAO	4,87	4,88	0,01	0,21	0,21	MBC
<b>Goundam</b>	GOU	5,25	5,21	-0,04	-0,76	0,76	MBC
<b>Kangaba</b>	KAN	3,70	4,01	0,31	8,38	8,38	MBS
<b>Kayes</b>	KAY	4,94	4,78	-0,16	-3,24	3,24	MBS
<b>Koro</b>	KOR	4,98	4,59	-0,39	-7,83	7,83	MBS
<b>Mopti/Sévaré</b>	MOP	4,42	4,56	0,14	3,17	3,17	MBS
<b>Niafunké</b>	NIA	4,96	4,96	0,00	0,00	0,00	MBC
<b>Nioro</b>	NIO	4,56	4,78	0,22	4,82	4,82	MBS
<b>San</b>	SAN	4,31	4,10	-0,21	-4,87	4,87	MBS
<b>Tombouctou</b>	TOM	4,71	4,96	0,25	5,31	5,31	MBC
				<b>Moyenne</b>	<b>0,18</b>	<b>3,80</b>	

### 3.9 Application de données utilisant WAsP

L'élément de véritable valeur ajoutée de la méthodologie d'atlas éolien numérique KAMM/WAsP est la capacité à appliquer les données d'atlas éolien généralisée dérivées à une micro-échelle à l'aide du logiciel WAsP. Cela permet à l'utilisateur de WAsP de procéder aux calculs de préféabilité pour tout site couvert par l'atlas éolien numérique et d'effectuer des estimations de production annuelle d'énergie pour un type d'éolienne et des caractéristiques spécifiques. Cette section présente une démonstration de ces applications.

Premièrement, l'utilisateur doit évaluer les données exactes généralisées de climat éolien pour un site donné. Ces données sont contenues dans un fichier dit *.lib-file*. Le Mali est couverte par un quadrillage de fichiers *.lib-file* espacés de 7,5 km constituant des dizaines de milliers de fichiers *.lib-file*.

Il existe deux méthodes pour accéder aux données climatiques généralisées du vent pour le Mali.

#### Méthode 1

Pour un accès hors ligne un logiciel simple est fourni pour téléchargement dans le site Web du projet ([www.frsemali.org](http://www.frsemali.org)). En exécutant ce logiciel, l'utilisateur est invité à indiquer la longitude et la latitude du lieu concerné, et le logiciel copie la pertinente *.lib-file* contenant les données de climat éolien généralisées dans le dossier adéquat. Une capture d'écran de cette application est reproduite à la Figure 3.12. Le site Web du projet comprend également un guide d'utilisation cet outil de sélection des *lib-file* 'hors ligne'

```
C:\p-12566_c\KAMM-WAsP-Projects\Mali2\LibGrid_workshop\Programs\libselm.exe

#####
#####
MALI NUMERICAL WIND ATLAS .LIB SELECTOR TOOL
#####
#####
DTU WIND ENERGY DENMARK 2012
#####
#####
Please give coordinates for location of interest
using decimal degrees for longitude and latitude
(enter 999 to exit program)
Longitude?
11.5
Latitude?
14.5

Your chosen longitude and latitude is
348.5000 14.5000

This location is within the following grid(s)
MBS75_50_latwa

The closest .lib file(s) named below from the above grid(s) will be
written to the folder ..\Output .

copy ..\LibGrid_MBS75_50_latwa\MBS75_50_latwa_11.528W_14.482N_7.4_7.5.lib ..\O
utput
The system cannot find the path specified.

#####
#####

#####
#####
MALI NUMERICAL WIND ATLAS .LIB SELECTOR TOOL
#####
#####
DTU WIND ENERGY DENMARK 2012
#####
#####
Please give coordinates for location of interest
using decimal degrees for longitude and latitude
(enter 999 to exit program)
Longitude?
```

Figure 3.12 : Capture d'écran de l'outil de sélection des fichiers lib-file.

## Méthode 2

Pour accès en ligne, un outil alternatif de sélection des *.lib-file* est disponible. Elle est dénommée Tadpole et utilise une interface Google Earth pour permettre à l'utilisateur de naviguer, de sélectionner un site d'intérêt et de télécharger les données de climat éolien généralisées. Un lien vers le serveur Tadpole est disponible sur le site web du projet ([www.frsemali.org](http://www.frsemali.org)). Une capture d'écran de Tadpole est donnée dans la Figure 3.13. Le site Web du projet comprend également un guide d'utilisation Tadpole



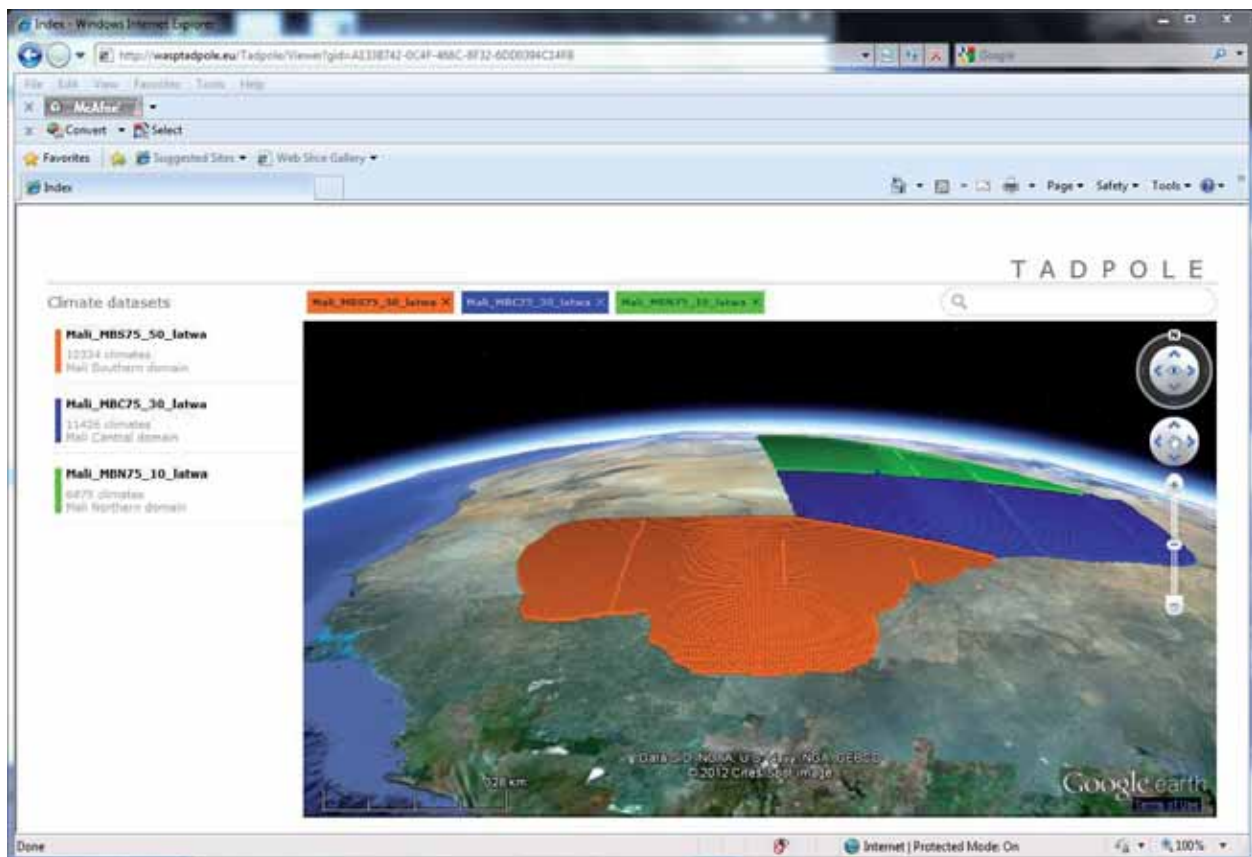


Figure 3.13. Capture d'écran du Tadpole, l'outil de sélection de lib-file sur le Mali. Les points, orange, bleu et verts indiquent les endroits de lib-file. L'utilisateur peut naviguer, zoomer, et parcourir la carte et en cliquant sur un point permet à l'utilisateur de télécharger le lib-file de sorte qu'il peut être appliqué dans WASP

## WASP

Une fois téléchargé, le fichier .lib-file peut être utilisé dans le logiciel WASP pour effectuer une modélisation micro-échelle. La Figure 3.14 présente une capture d'écran des résultats WASP affichés dans Google Earth. Cette fonctionnalité d'affichage fait partie de WASP. L'application a été utilisée pour calculer la variation de la production annuelle d'énergie suivant le relief au sud de Kayes. Le logiciel est un outil très puissant de localisation de sites potentiels d'implantation d'éoliennes ailleurs que sur les sites de relevé et d'estimation de la production annuelle d'énergie d'éoliennes spécifiques par combinaison des informations sur la distribution directionnelle de la vitesse du vent avec la courbe de puissance de l'éolienne

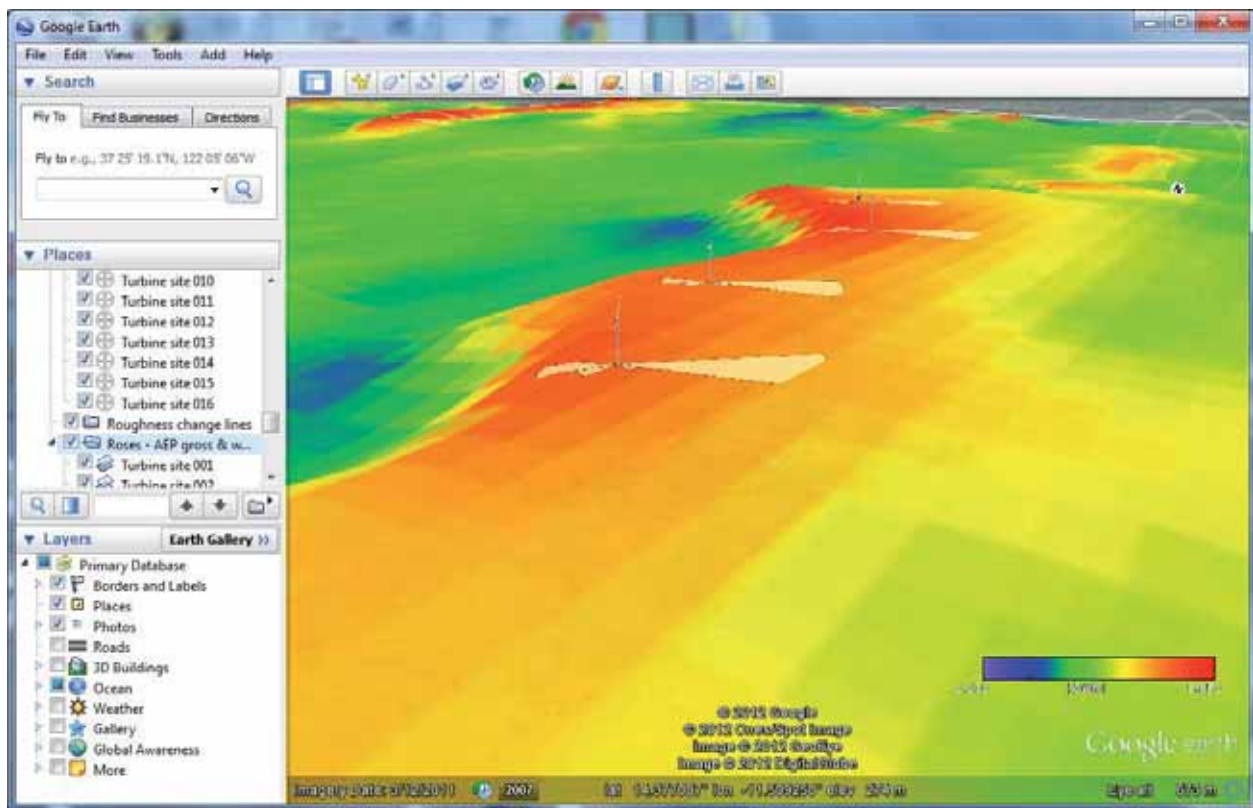


Figure 3.14 : Capture d'écran présentant le logiciel WAsP en cours d'utilisation pour calculer la vitesse du vent moyenne annuelle à 70 m du niveau du sol pour une surface de 4,5 km par 4,5 km à une résolution de 100 m. La zone comprend la station de relevé (à proximité de la limite ouest) et un site d'implantation d'éolienne hypothétique (angle nord-est). Une prédiction de climat éolien peut être calculée pour n'importe quel emplacement et une estimation de la production annuelle d'énergie d'une éolienne peut être obtenue à l'aide de WAsP. Les données d'entrée sont des données de climat éolien généralisées provenant du calcul d'atlas éolien numérique KAMM/WAsP. Ce calcul n'est qu'un exemple. La rugosité de surface utilisée est de 0,02 m partout. Un relevé topographique doit être effectué pour affiner les détails de la carte de calcul

### 3.10 Résumé

La ressource éolienne a été estimée pour l'ensemble du Mali avec une résolution de 7,5 km par la méthodologie d'atlas éolien numérique KAMM/WAsP. Le pays entier a été couvert par trois domaines et trois ensembles de classes de vent ont été utilisés pour capturer les variations de forçage à grande échelle sur le pays. Le résultat final comprend des statistiques climatiques généralisées pour n'importe quel point du Mali, qui indiquent la distribution de la direction et de la vitesse du vent. Les statistiques climatiques généralisées modélisées peuvent être utilisées directement dans le logiciel WAsP. Celui-ci permet ensuite l'inclusion d'informations topographiques à haute résolution. WAsP peut alors être utilisé comme outil pour des études de vérification des données KAMM/WAsP et pour des études de faisabilité par calcul d'estimations de production annuelle d'énergie éolienne pour n'importe quel lieu.



L'atlas éolien numérique a été vérifié par confrontation avec 12 sites de relevé pour lesquels un an de données ont été collectées. La tolérance prévue par la méthodologie pour la courte période de relevé offre un moyen de comparaison de l'atlas dérivé de valeurs numériques avec les relevés. Une erreur absolue moyenne de 4,3 % a été déterminée. Ce niveau d'incertitude correspond à l'incertitude attendue pour la méthodologie KAMM/WAsP, telle qu'observée dans d'autres projets, dans d'autres parties du monde.

Les résultats préliminaires montrent une ressource éolienne relativement faible mais qui, dans certaines conditions, pourrait être économiquement faisable, c'est-à-dire sur des sites bénéficiant d'un rayonnement favorable, produisant des vents plus soutenus, et où une utilisation pratique est possible, compte tenu du raccordement au réseau ou du remplacement ou du renforcement des systèmes de production d'électricité à base diesel.

### 3.11 Remerciements

Les données de réanalyse NCEP/NCAR sont fournies par le NCEP (National (USA) Center for Environmental Prediction, Centre national (américain) de prévision environnementale) et le NCAR (National (USA) Center for Atmospheric Research, Centre national (américain) de recherche atmosphérique). Les données SRTM sont fournies par la NGA (National (USA) Geospatial Intelligence Agency, Agence nationale (américaine) de renseignement géospatial) et la NASA (National (USA) Aeronautics and Space Administration, Agence nationale (américaine) de l'aéronautique et de l'espace). Les données de rugosité sont dérivées de la **Classification GLCC globale de la couverture terrestre de l'USGS (United States Geological Survey, Commission géologique des Etats-Unis)**. KAMM est utilisé avec l'aimable autorisation de l'Université de Karlsruhe, en Allemagne.

## 4 Ressources solaires

### 4.1 Méthodologie

Cette section présente brièvement la méthodologie appliquée dans cette étude pour obtenir les cartes mensuelles et annuelles de la ressource en énergie solaire au Mali. Les paragraphes ci-après donnent plus de détails sur la méthode et les données utilisées.

Cette étude repose sur les estimations satellite de l'énergie solaire disponible à la surface utilisant le « flux de rayonnement descendant ondes courtes de surface » (DSSF) produit par le « *Land Surface Analysis – Satellite Applications Facility* » (LSA-SAF) (lien Internet [1]) et basées sur les données des satellites Meteosat Second Generation (MSG) géostationnaires (Schmetz et al. 2002). Ce produit permet d'obtenir une estimation du flux des ondes courtes (semi-)instantané toutes les 30 minutes en s'appuyant sur les données des bandes 1, 2 et 3 du capteur SEVIRI embarqué sur le MSG qui couvre la partie visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique. Ces valeurs sur 30 minutes sont ensuite additionnées pour obtenir une estimation quotidienne du rayonnement solaire quotidien, partant du principe que les estimations instantanées sont représentatives de la période de 30 minutes qu'elles couvrent. Les représentations quotidiennes sont ensuite combinées pour créer les cartes mensuelles et annuelles. La période d'étude de trois ans prise en compte dans ce rapport s'étend de juillet 2008 à juin 2011.

Pour que les cartes solaires obtenues correspondent bien aux conditions locales au Mali, nous avons choisi de calibrer les estimations satellite sur les données in situ disponibles pour la zone. Pour ce faire, nous avons analysé la correspondance entre les estimations quotidiennes des mesures in situ et satellite, pour ensuite calibrer les données satellite afin qu'elles concordent avec les niveaux absolus des données in situ. Les écarts entre les données in situ et les estimations satellite s'expliqueraient principalement par les conditions atmosphériques influant localement sur les estimations satellite basées sur un algorithme créé pour être appliqué au plein disque de la terre tel qu'il est vu par le MSG. En outre, la correspondance entre les deux séries de données sera également affectée par les erreurs dans les données in situ (causées par les bruits et les inexactitudes des instruments) et les erreurs des estimations satellite provenant de diverses sources.

### 4.2 Données

#### Le produit LSA-SAF DSSF

Comme nous l'avons vu, la présente étude s'appuie sur le produit DSS LSA-SAF. Ce produit est dérivé des données du capteur SEVIRI embarqué dans le satellite géostationnaire Meteosat deuxième génération exploité par Eumetsat. Bien qu'il ait été conçu à l'origine à des fins météorologiques, il s'est avéré utile pour un certain nombre d'applications terrestres à cause du nombre de bandes spectrales et de leur position dans les parties visibles, proches infrarouges et infrarouges thermiques du spectre électromagnétique. Pour la cartographie des ressources en énergie solaire, les bandes 1, 2 et 3 sont positionnées dans le domaine spectral où l'énergie solaire émise est la plus élevée. Ces bandes sont centrées sur 0,6  $\mu\text{m}$ , 0,8  $\mu\text{m}$  et 1,6  $\mu\text{m}$ , tandis que le produit DSSF estime le flux entre 0,3  $\mu\text{m}$  et 4  $\mu\text{m}$ . Le produit exploite la haute résolution temporelle du capteur SEVIRI qui fournit des données toutes les 15 minutes, afin de donner une estimation du rayonnement ondes courtes (toutes les 30 minutes). Cela permet à la méthode de cartographier les changements de la couverture nuageuse avec une fréquence temporelle élevée sur la journée, ce qui est essentiel dans la mesure où la couverture nuageuse est le facteur le plus important déterminant la quantité d'énergie solaire disponible à la surface. L'algorithme appliqué dans la génération du produit est par conséquent également très dépendant des informations

relatives à la couverture nuageuse, qui sont aussi dérivées des bandes spectrales SEVIRI (mais qui comprennent également des données des canaux infrarouges moyens et infrarouges thermiques). La paramétrisation de base du flux de rayonnement descendant des ondes courtes de surface ( $F^\downarrow$ ) dans l'algorithme est l'équation suivante :

$$F^\downarrow = F_0 \nu(t) \cos \theta_s T$$

Où  $F_0$  est la constante solaire (réglée pour le domaine spectral du produit),  $\theta_s$  est (le cosinus de) l'angle du zénith solaire,  $\nu(t)$  est un facteur représentant la distance soleil-terre variable en fonction du jour de l'année et  $T$  est la transmission réelle du système atmosphère ou atmosphère-nuage. La paramétrisation de  $T$  dans l'algorithme dépend du marquage, nuageux ou non, d'un pixel donné. La méthode du ciel clair nécessite des données entrantes sur la vapeur d'eau atmosphérique et le contenu en ozone, la visibilité ainsi que le type d'aérosol dominant. Dans les cas nuageux, le flux solaire descendant à la surface est inversement corrélé avec la réflectance du sommet des nuages dans les canaux SEVIRI 1 à 3. De plus, il est estimé à l'aide d'un modèle de réflectance angulaire et de la paramétrisation de la transmission des nuages.

Le rapport de validation du produit LSA-SAF indique une tendance à la surestimation du flux descendant dans les conditions de ciel dégagé, en particulier sur les sites de validation africains (tous situés en Afrique de l'Ouest). Elle correspond aux conclusions de la présente étude détaillées ci-après.

#### **Mesures in situ du rayonnement solaire au Mali**

Le CNESOLER a fourni des mesures in situ provenant de 10 sites sur le terrain au Mali, dont 8 contenaient des mesures du rayonnement solaire entrant (voir Figure 4.1). L'analyse a montré que l'une de ces stations, Gossi, avait eu un problème d'instrument en janvier 2009 et par conséquent nous l'avons exclue de l'étude. Les autres stations ont fourni des données pour différentes parties de la période étudiée, les dernières données disponibles datant du 18 octobre 2011. Les mesures fournies correspondent à des intervalles de 10 minutes pendant toute la durée de la journée, mais aucune des stations ne couvre la période entière. Pour la présente étude, 5 stations ont été sélectionnées pour le calibrage de notre méthode, dont 2 (Bandiagara et Gao) ont été retenues pour la validation. Le choix des stations pour le calibrage a été décidé de manière aléatoire. Pour tous les sites, l'instrument utilisé a été un pyranomètre Licor. Les mesures in situ utilisant des pyranomètres sont généralement de bonne qualité, même si le manque de nettoyage et la dérive du capteur ont pu affecter la précision au fil du temps.

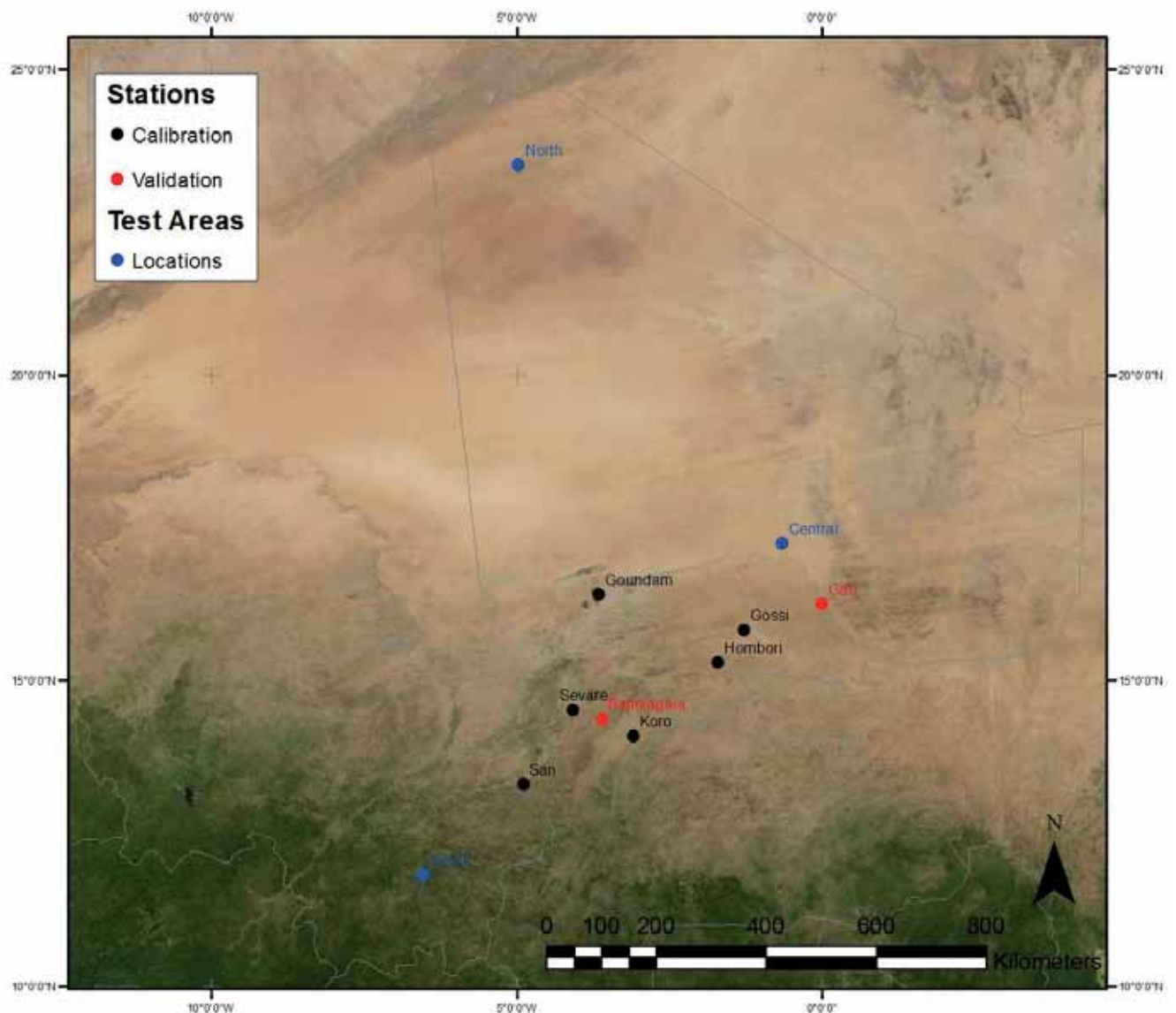


Figure 4.1 : Emplacements de 8 stations sur le terrain pour lesquelles des mesures in situ du rayonnement ondes courtes entrant étaient disponibles. Les zones indiquées en bleu sont celles utilisées pour représenter les domaines nord, central et sud à la section sur la validation.

### Remplissage des données manquantes

Dans les intervalles de 30 minutes du DSSF LSA, il manque un certain nombre de données dont il faut tenir compte dans le calcul des totaux quotidiens et mensuels. En l'occurrence, le remplissage des données manquantes a comporté plusieurs étapes pour garantir la cohérence globale des données. Nous n'avons traité que les produits de 30 minutes situés entre 05:00 et 19:00 UTC, étant donné que les intervalles en dehors de cette période ne contribuent pas aux totaux quotidiens pour le Mali.

- 1) Les vides ponctuels dans les données de 30 minutes ont été remplis à l'aide d'une interpolation linéaire. Cette méthode n'introduira que très peu d'incertitude dans les totaux quotidiens, sauf lorsque le vide se situe près du midi solaire.
- 2) Les totaux quotidiens ont été calculés pour tous les jours dont les données étaient complètes (avec un total de 29 intervalles de 30 minutes).
- 3) Pour les jours ayant des données manquantes, les totaux quotidiens ont été interpolés de manière linéaire en utilisant, lorsque cela était possible, les données des deux jours précédents et des deux jours suivants (la même pondération étant attribuée aux quatre jours).
- 4) Pour les jours pour lesquels la méthode de l'étape 3 n'était pas possible (les données des quatre jours adjacents n'étant pas disponibles), nous avons appliqué une méthode manuelle jour par jour en décidant soit de remplir les intervalles de 30 minutes manquants, soit d'utiliser trois ou quatre des totaux quotidiens les plus proches pour interpoler la valeur du jour concerné.

La série totale entre le 01/07/2008 et le 30/06/2011 est de 1095 jours, ce qui donne un nombre potentiel de 31755 intervalles de 30 minutes, dont 30742 (96,8 %) ont été fournis par le LSA-SAF et les 99 manquants ont été remplis par l'étape 1. L'étape 2 a produit 976 images quotidiennes (89 %), tandis que les étapes 3 et 4 combinées ont porté sur 119 jours.

### 4.3 Calibrage

Pour commencer, la concordance entre les images quotidiennes produites par le LSA-SAF et les mesures in situ sur les cinq sites sélectionnés a été analysée. Pour ce faire, nous avons analysé les intervalles de la série chronologique des deux séries de données (pour chaque site), ainsi que les nuages de points. Notez que les données des deux sources n'ont été prises en compte que lorsque toutes les données étaient disponibles pour un jour donné. Ce qui signifie que les jours ayant fait l'objet d'un remplissage selon la méthode décrite ci-dessus n'ont pas été pris en compte dans les comparaisons et le calibrage qui a suivi.

La Figure 4.2 montre un exemple de concordance entre les mesures in situ et les estimations obtenues par télédétection pour le site de Sévaré. La concordance est bonne avec une valeur  $r^2$  de 0,89, un petit écart et un gain proche de 1. Globalement, les gains se situent tous entre 0,95 et 1,07 et les valeurs  $r^2$  entre 0,75 et 0,89 (après exclusion des données visiblement erronées, par ex. celles de la deuxième moitié de la série chronologique sur le site de Gossi). Lors de l'analyse d'un intervalle de la série chronologique des deux séries de données (voir le haut de la Figure 4.3), on voit qu'il existe des tendances saisonnières dans la concordance entre les deux types de mesures. Il est évident que les estimations du LSA-SAF sont généralement plus élevées que les mesures in situ et que la différence entre les deux est plus grande pendant l'été que pendant l'hiver. La tendance présentée sur la Figure 4.3 (haut) est similaire à celle constatée sur les autres sites, sauf que les valeurs LSA-SAF sont dans certains cas inférieures aux mesures in situ pendant l'hiver, même si elles restent supérieures pendant l'été. Ces résultats amènent à la conclusion que même si la concordance globale est bonne malgré une légère tendance du LSA-SAF à surestimer le flux ondes courtes descendant, les variations saisonnières de la concordance existent et nécessitent une approche datée du calibrage.

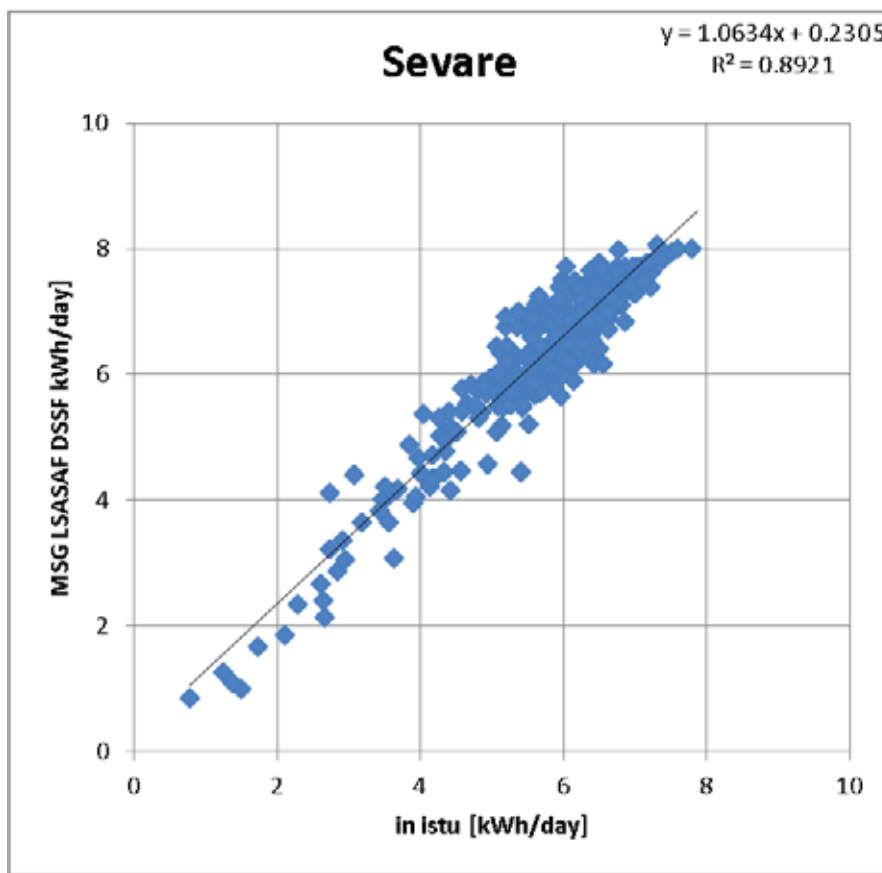


Figure 4.2 : Nuage de points indiquant la concordance entre les mesures in situ et le produit LSA-SAF pour le site de Sévaré. La ligne verte se trouve sur la ligne 1:1.

Un système de calibrage a été conçu en tenant compte de la dépendance temporelle de la concordance entre les estimations in situ et celles obtenues par télédétection. Toutes les données des cinq sites ont été regroupées par mois, puis comparées avec les données de télédétection. Puis des analyses de régression ont été effectuées entre les deux séries de données à l'aide d'une régression standard des moindres carrés linéaires, les données in situ étant les variables indépendantes et les estimations de télédétection les variables dépendantes. L'utilisation de la régression standard des moindres carrés linéaires permet de réduire au minimum les résidus de la variable dépendante, en partant réellement de l'hypothèse que les données in situ sont parfaites et que les erreurs affectent surtout les estimations de télédétection. Cette hypothèse est justifiée en l'occurrence par le fait que les régressions pour les cinq stations analysées sont très semblables et à cause de la précision généralement très élevée des mesures in situ du rayonnement ondes courtes entrant.

Les régressions mensuelles sont ensuite utilisées pour ajuster les estimations de télédétection afin qu'elles correspondent mieux au niveau des mesures in situ sur l'année. La Figure 4.3 (bas) montre un exemple de résultat du calibrage. Ce calibrage des données n'améliore pas forcément l'ajustement de chacun des jours, mais il corrige le niveau des valeurs sur l'ensemble de la série chronologique. Lorsque l'on analyse les données des cinq stations prises en compte dans le calibrage uniquement pour les jours complets, l'erreur-type passe de 0,74 kWh/m<sup>2</sup>/jour à 0,39 kWh/m<sup>2</sup>/jour tandis que l'erreur absolue moyenne passe de 0,59 kWh/m<sup>2</sup>/jour à 0,30 kWh/m<sup>2</sup>/jour.



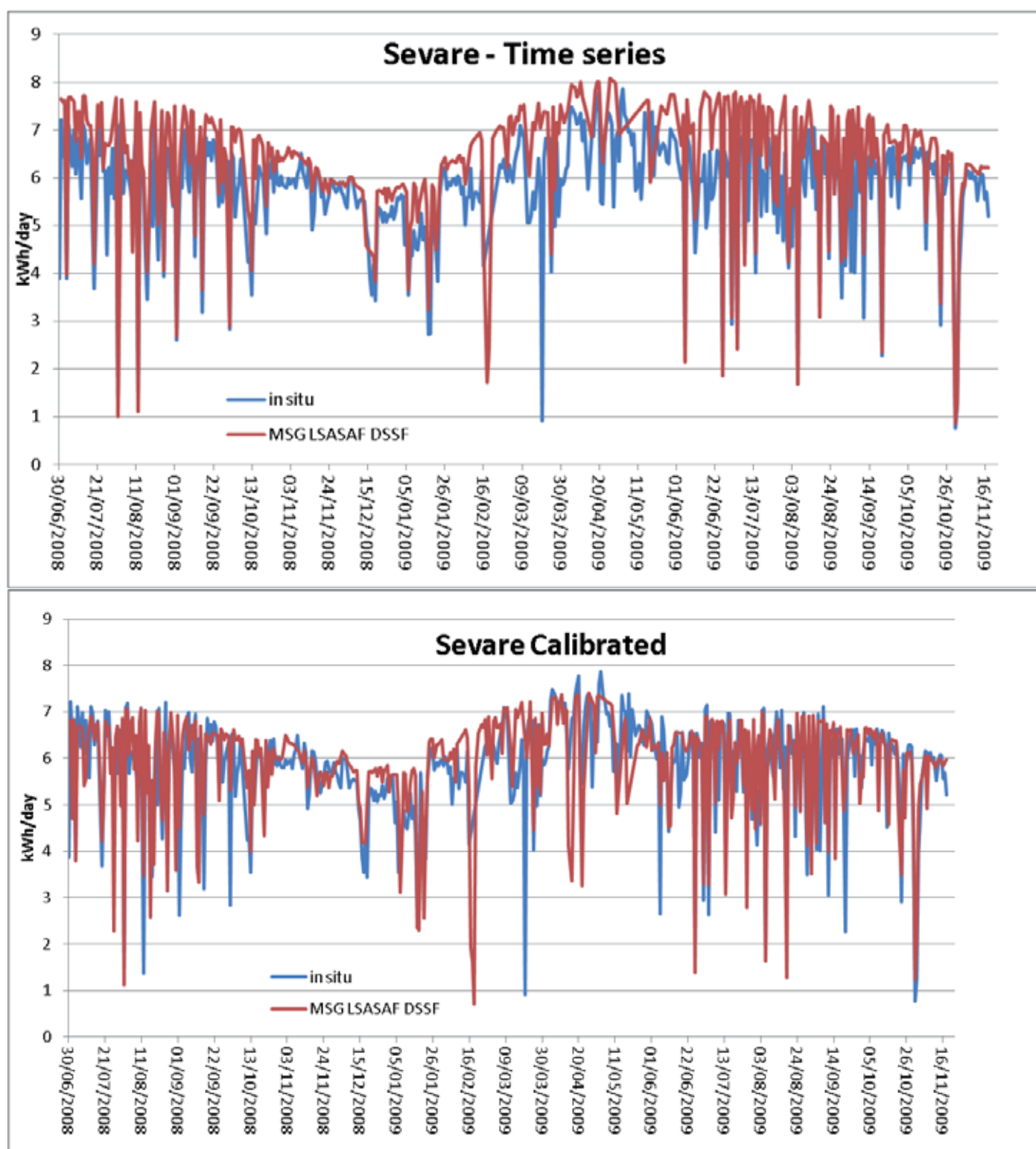


Figure 4.3 : Haut : Série chronologique des données in situ et LSA pour le site de Sévare. Notez les différences saisonnières entre les deux séries de données de la concordance. Bas : Même série chronologique, mais avec la version calibrée des données LSA-SAF basée sur les régressions mensuelles.



## 4.4 Validation

La validation du calibrage décrit ci-dessus a été effectuée à l'aide des données in situ de deux stations, Gao et Bandiagara, non incluses dans le calibrage. Pour les deux stations, les changements sont minimes dans la régression (par rapport aux comparaisons avec les valeurs LSA-SAF), mais comportent de légères augmentations des valeurs  $r^2$  qui passent de 0,80 (pour les deux stations) à 0,83 et 0,86 respectivement (voir Figure 4.4).

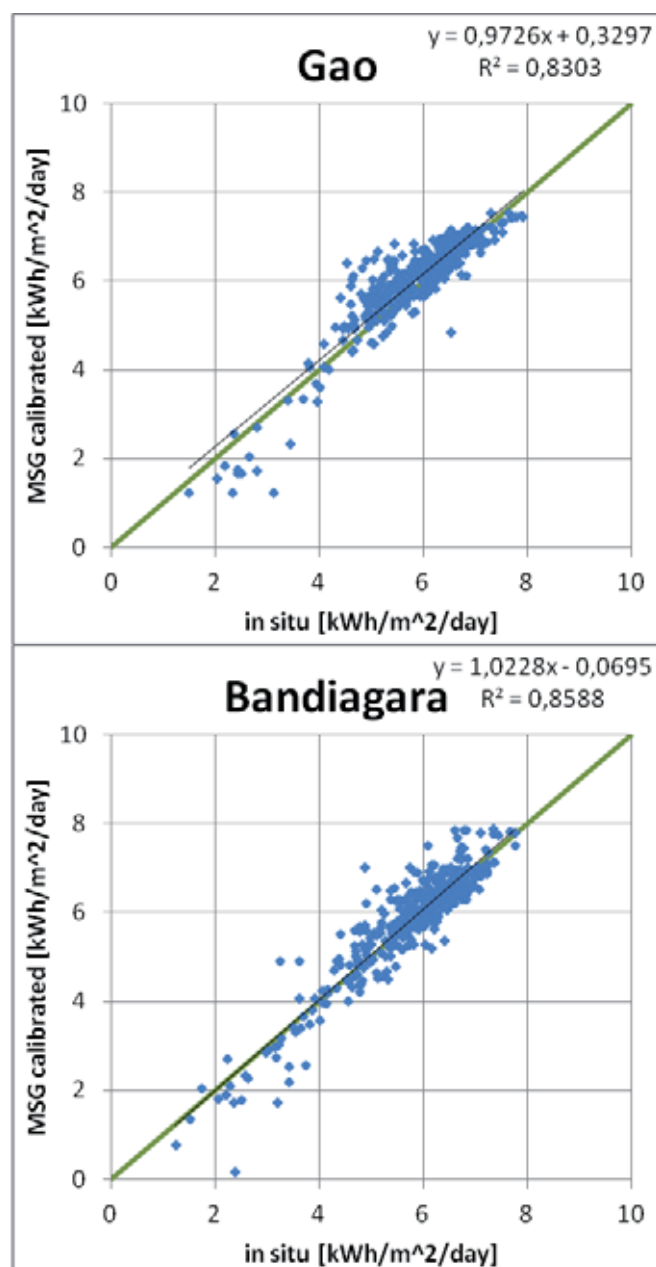


Figure 4.4 : Nuages de points pour les deux sites de validation. Les lignes vertes sont sur les lignes 1:1 et les lignes noires sur les lignes de régression. Les données prises en compte ne concernent que les jours ayant une couverture complète à la fois pour les données in situ et de télédétection.

Notez que les résultats ne comprennent que les jours pour lesquels une série chronologique in situ et une série LSA-SAF complète sont disponibles, ce qui exclut par conséquent les jours pour lesquels les données manquantes ont été remplacées a posteriori. Comme indiqué dans l'exemple de calibrage de Sévaré ci-dessus, le niveau des mesures correspond plus aux valeurs LSA-SAF après le calibrage qu'avant grâce au système de calibrage mensuel (non présenté).

## 4.5 Ressources solaires

Les figures 4.5 et 4.6 montrent la répartition spatiale des ressources solaires au Mali. Ces figures indiquent le rayonnement solaire moyen pour les années 2008 à 2011. Des cartes similaires pour chacune des trois années sont fournies à l'Annexe D.

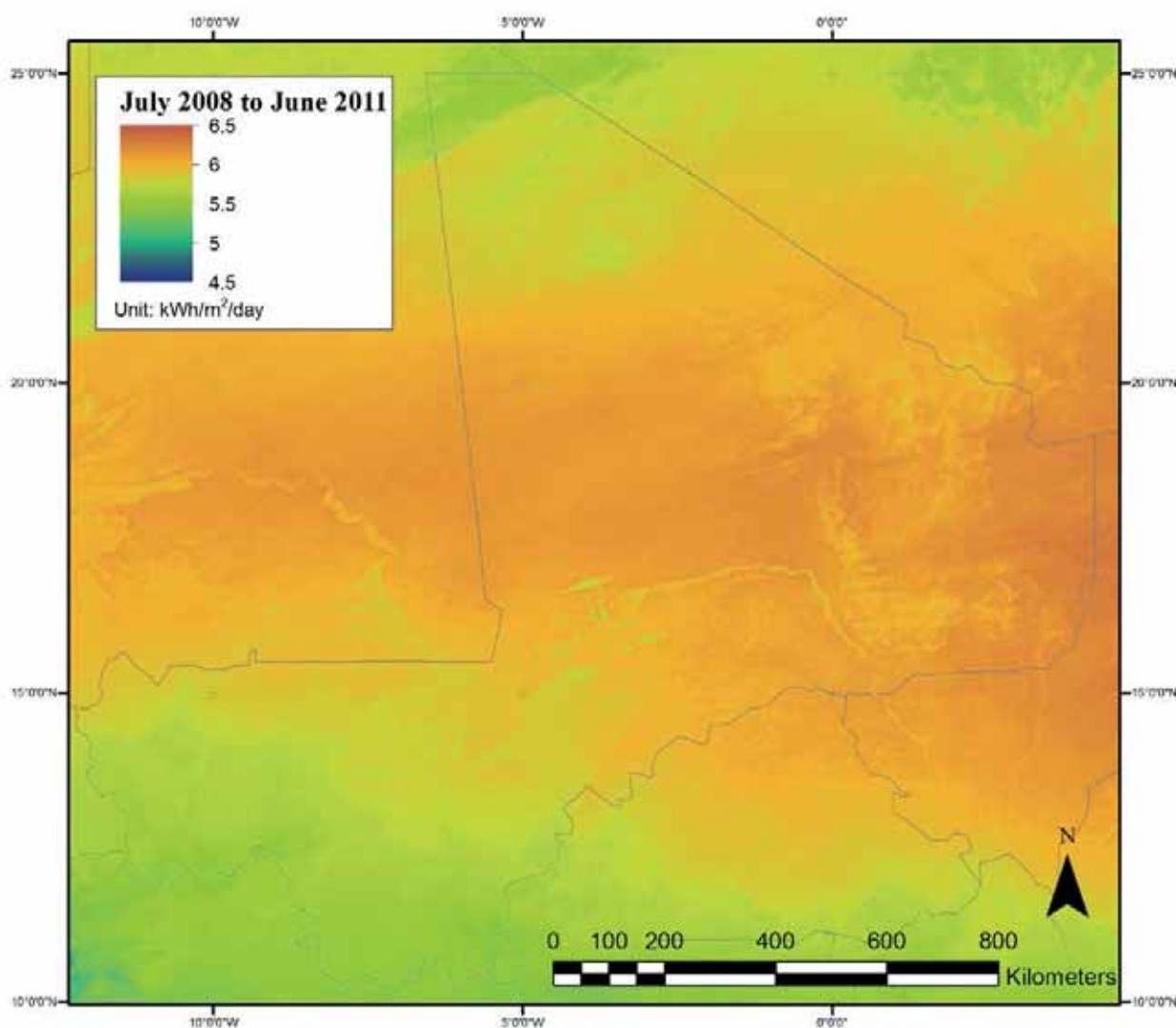


Figure 4.5 : Rayonnement solaire quotidien moyen pour la période entre juillet 2008 et juin 2011. Des cartes similaires pour les trois années sont fournies à l'Annexe D.

Notez que des caractéristiques relatives à la couverture terrestre apparaissent dans les composites qui couvrent les séries longues. Cela est dû au fait que les calculs utilisent l'albédo de surface, ce qui introduit une légère sensibilité à ce paramètre. Lorsqu'on élabore des composites qui couvrent de longues périodes, ces petites différences se cumulent et deviennent visibles sur les cartes solaires. C'est ce que l'on constate dans les composites mensuels (Annexe D), où certains éléments de la surface terrestre restent visibles, mais sont beaucoup moins prononcés que dans les composites annuels ou tri-annuels.

La Figure 4.6 montre les informations de la Figure 4.5 avec une résolution de 1 degré (110\*110) km. Le rayonnement solaire moyen pour les trois années est indiqué en kWh/m<sup>2</sup>/jour. Les cartes mensuelles et annuelles du rayonnement solaire cumulé sont fournies à l'Annexe D pour les 36 mois couverts.

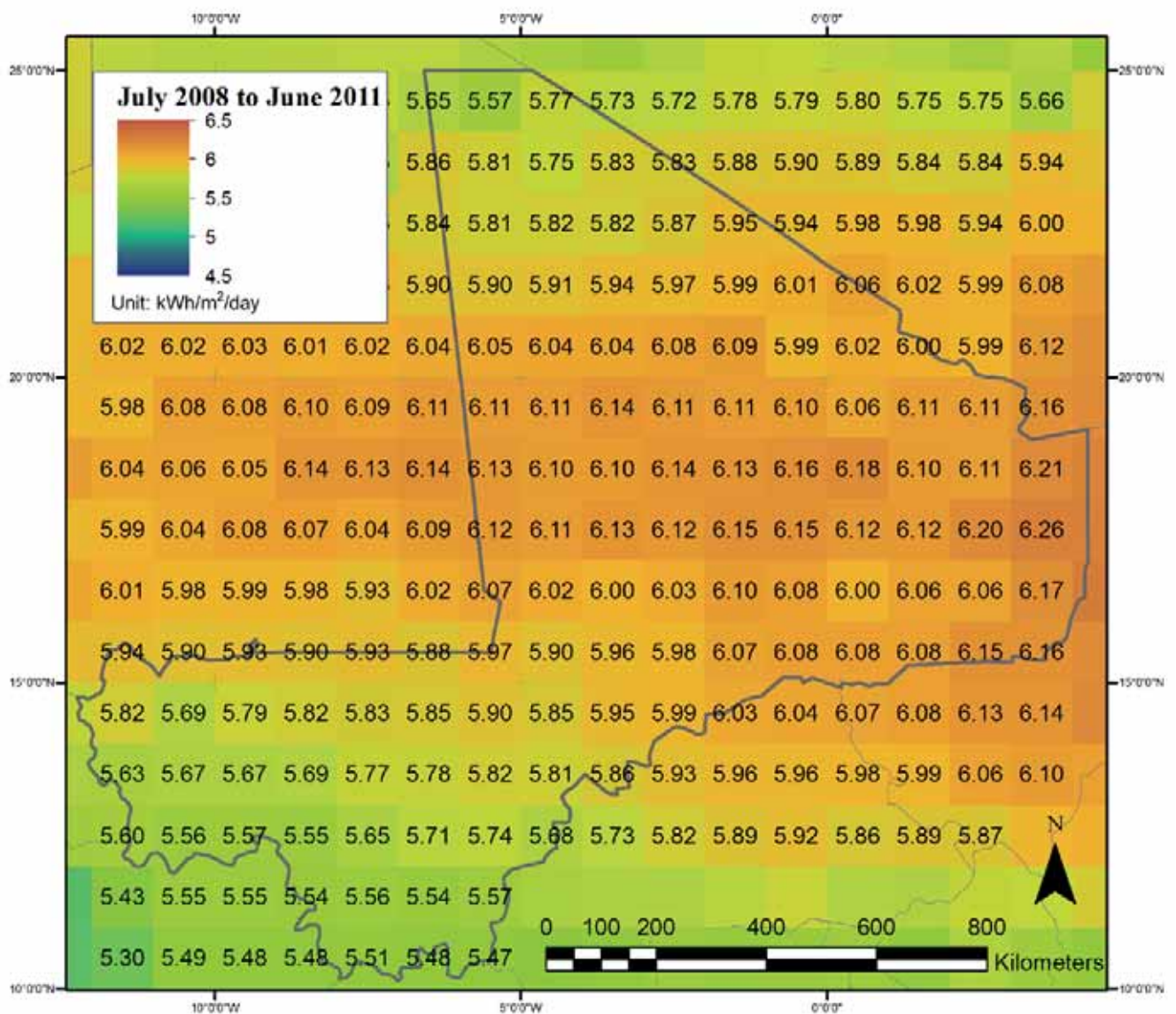


Figure 4.6 : Rayonnement solaire quotidien moyen pour la période entre juillet 2008 et juin 2011. Des cartes similaires pour les trois années sont fournies à l'Annexe D.

Les figures ci-dessus montrent qu'il existe des différences importantes entre le nord et le sud au Mali, à cause des différences saisonnières de la couverture nuageuse et de la position du soleil. Nous avons extrait la série chronologique des estimations de rayonnements quotidiens pour trois sites représentant le nord, le centre et le sud du pays (voir les emplacements sur la Figure 4.1). Le site au nord est situé presque sur le tropique du cancer où le soleil est au zénith au moment du solstice d'été. Par conséquent, l'amplitude de la série chronologique de rayonnement solaire la plus élevée doit logiquement correspondre à cette position où les variations de l'angle du zénith solaire sont les plus importantes. En plus des différences dans la géométrie soleil-terre des trois sites, la couverture nuageuse et la teneur en aérosols de l'atmosphère induisent également de grandes variations temporelles dans le rayonnement solaire. L'hivernage commence en mai-juillet dans le sud et progresse lentement vers le nord. Les différences dans la couverture nuageuse et le chronométrage de la couverture nuageuse (combinées avec les changements temporels de la position du soleil) entraînent également un décalage entre les séries chronologiques des trois sites. Sur le site au sud, le rayonnement solaire est le plus élevé en avril lorsque le soleil est presque au zénith et avant le démarrage de l'hivernage. Pour les sites au centre et au nord, le rayonnement le plus élevé s'observe plus tard en mai ou en juillet.

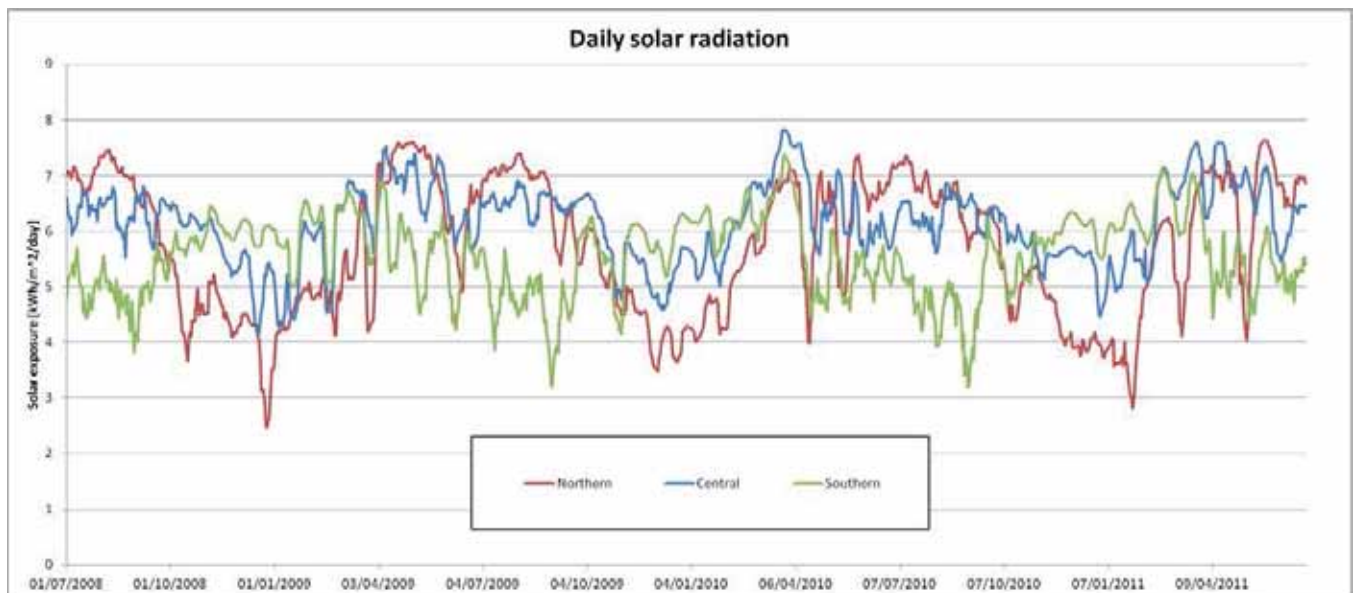


Figure 4.7 : Série chronologique des trois zones présentées à la Figure 4.1 montrant les différences de rayonnement solaires entre le nord et le sud du Mali. Notez que la série chronologique a été lissée en utilisant une moyenne mobile de 9 jours.

La Figure 4.7 montre aussi clairement qu'il existe une variation inter-annuelle importante, à cause des différences de météo et de nébulosité d'une année sur l'autre. Les Figures 4.8 à 4.10 montrent les variations annuelles du rayonnement solaire pour les trois sites, ainsi que la moyenne (par mois) pour la période étudiée de trois ans que nous analysons. Par comparaison, nous avons également pris en compte des données provenant de la base de données NASA POWER/SSE (lien Internet [2]) qui montrent les valeurs moyennes mensuelles pour la période entre 1983 et 2005. En général, les estimations DSSF MSG et celles de la NASA concordent bien, même si les premières sont un peu plus faibles au printemps et en été sur le site du centre.

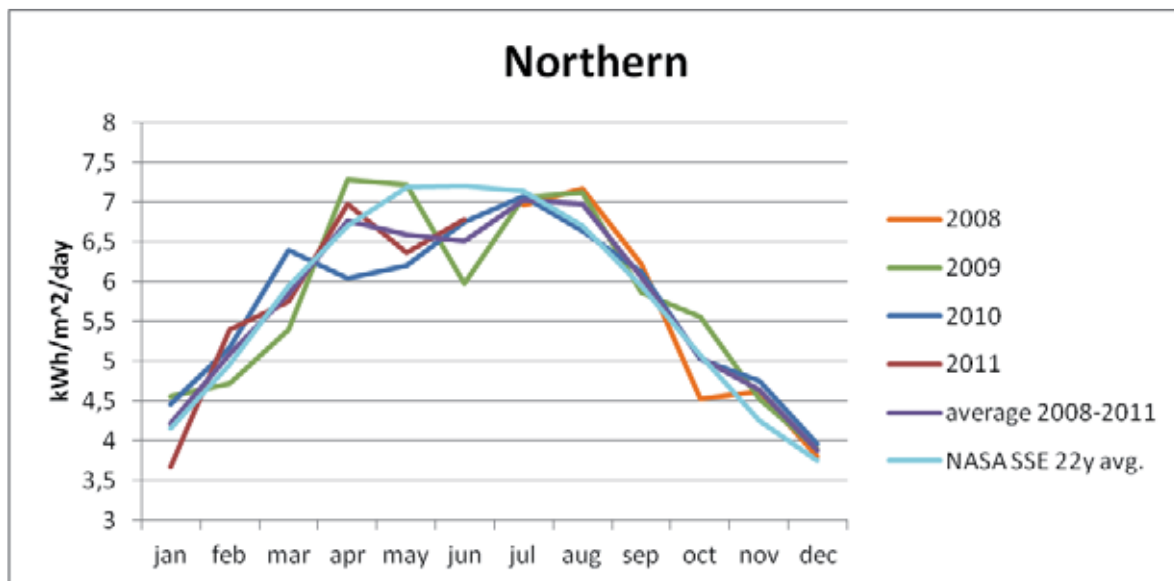


Figure 4.8 : Comparaison entre les 3 années de données du produit MSG DSSF et la série des données NASA SSE historiques (1983-2005) pour le site du nord (voir l'emplacement sur la Figure. 4.1).

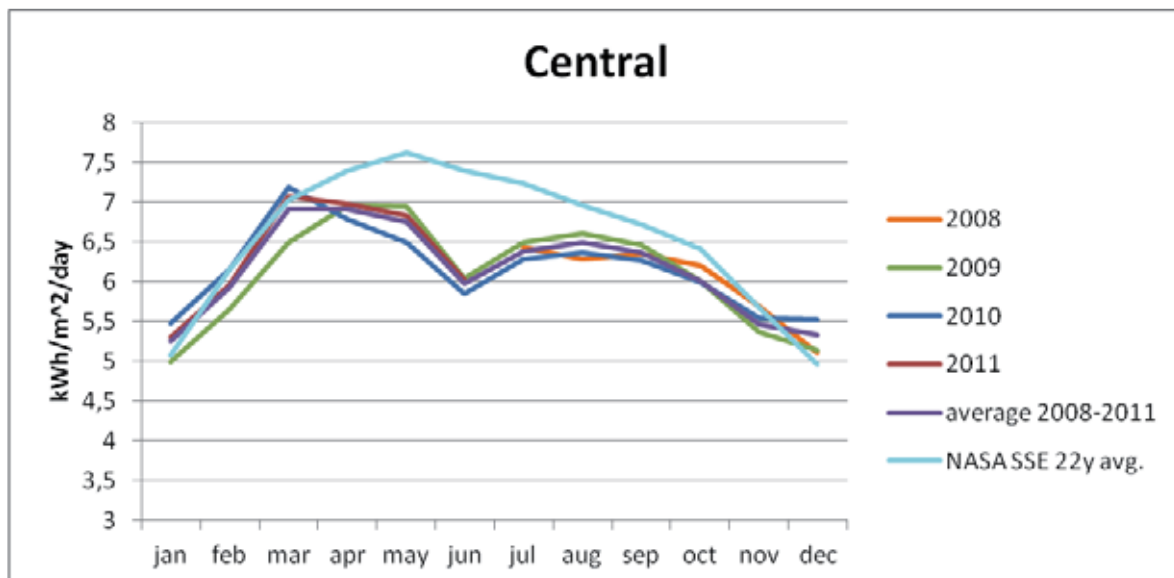


Figure 4.9 : Comparaison entre les 3 années de données du produit MSG DSSF et la série des données NASA SSE historiques (1983-2005) pour le site du centre (voir l'emplacement sur la Figure. 4.1).



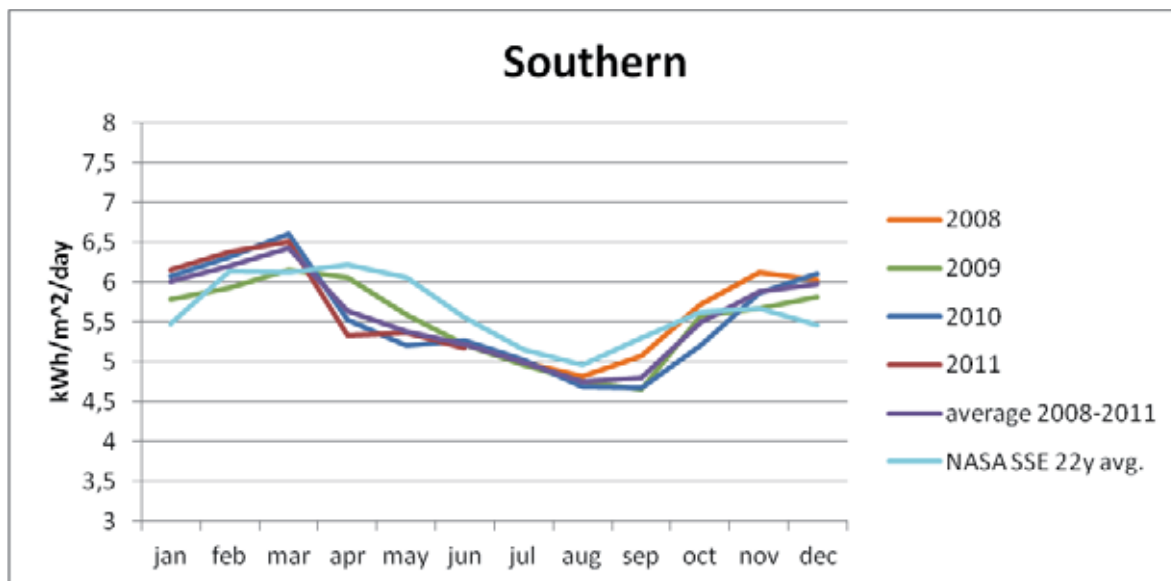


Figure 4.10 : Comparaison entre les 3 années de données du produit MSG DSSF et la série des données NASA SSE historiques (1983-2005) pour le site du sud (voir l'emplacement sur la Figure. 4.1).

Le cycle diurne moyen de rayonnement solaire par mois est présenté à la Figure 4.11 pour les trois sites. Notez que les heures sont indiquées en temps universel et que les petits décalages horizontaux des courbes sont au moins en partie dus aux changements saisonniers du chronométrage du midi solaire, même si les différences de chronométrage des valeurs maximales entre les trois sites peuvent également être liées à leurs positions absolues.

Tableau 4.1 : Comparaison entre la moyenne des 3 années de données du produit MSG DSSF et la série des données NASA SSE historiques (1983-2005) pour les trois sites (voir les emplacements sur la Figure. 4.1).

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
<b>Nord</b>												
<b>Moyenne 2008-11</b>	4,23	5,10	5,85	6,77	6,60	6,50	7,03	6,98	6,07	5,04	4,64	3,89
<b>Nasa SSE</b>	5,08	6,16	7,02	7,39	7,62	7,39	7,23	6,96	6,72	6,42	5,68	4,96
<b>Centre</b>												
<b>Moyenne 2008-11</b>	5,25	6,16	7,02	7,39	7,62	7,39	7,23	6,96	6,72	6,42	5,68	4,96
<b>Nasa SSE</b>	4,15	4,97	5,95	6,70	7,19	7,21	7,14	6,71	5,94	5,07	4,26	3,75
<b>Sud</b>												
<b>Moyenne 2008-11</b>	6,00	6,21	6,42	5,65	5,38	5,22	4,99	4,76	4,80	5,50	5,89	5,98
<b>Nasa SSE</b>	5,48	6,14	6,13	6,22	6,06	5,56	5,16	4,96	5,30	5,63	5,68	5,46



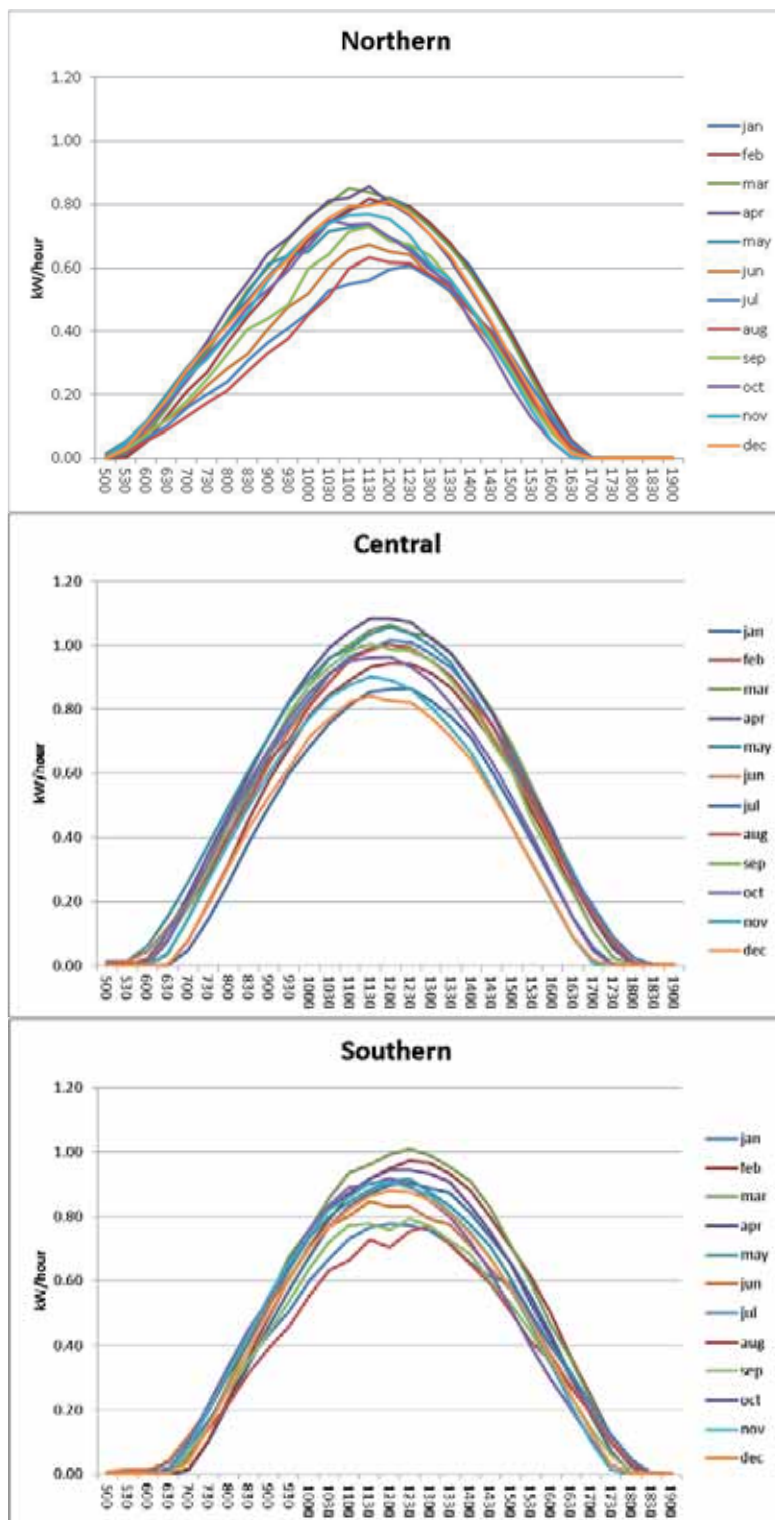


Figure 4.11 : Variation diurne moyenne mensuelle du rayonnement solaire (calculée comme la moyenne pour chaque heure spécifique de la journée pour les trois années) pour les trois sites présentés à la Figure 4.1.

## 4.6 Résumé, analyse et conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons évalué les ressources en énergie solaire du Mali entre juillet 2008 et juin 2011 à l'aide d'une estimation par télédétection du flux de rayonnement descendant ondes courtes. Nous avons estimé nécessaire de calibrer les estimations par télédétection, après avoir constaté une tendance à la surestimation de l'énergie solaire disponible à la surface par comparaison aux données fournies par cinq stations sur le terrain au Mali. Les estimations par télédétection ont été ajustées mois par mois pour prendre en compte leurs différences saisonnières avec les données in situ. Le calibrage a permis d'améliorer le coefficient de détermination et de réduire l'erreur-type pour les données de calibrage et de validation. La validation basée sur les données in situ de deux stations indépendantes a donné des résultats légèrement meilleurs après le calibrage avec des valeurs  $r^2$  autour de 0,85 pour les comparaisons entre les estimations in situ et par télédétection concernant les jours pour lesquels les données étaient complètes. Notez que toutes les opérations de calibrage et de validation ont été effectuées à l'échelle journalière, même si l'étude a produit des cartes mensuelles et annuelles du rayonnement solaire, justifiant une optimisation du calibrage pour éviter les écarts systématiques plutôt qu'une optimisation pour obtenir des images quotidiennes de la meilleure qualité.

Nous avons ajouté les valeurs manquantes pour que les séries de données soient complètes. Ce remplissage a été effectué à différentes échelles temporelles pour réduire au minimum les erreurs potentielles et obtenir une série de données cohérente. Là encore, l'approche choisie visait à produire des résultats optimaux à l'échelle mensuelle et à l'échelle annuelle, au détriment des détails à l'échelle temporelle quotidienne ou des intervalles de 30 minutes.

Comparés avec les résultats présentés dans le rapport « Carte provisoire de ressources renouvelables du Mali » qui montraient une tendance à la sous-estimation par rapport aux données de la base NASA PPOWER/SSE, les résultats présentés concordent très bien avec les données in situ (après calibrage), sans écarts importants. Malheureusement, la base de données NASA ne contient que des données jusqu'en 2005, ce qui ne nous a pas permis d'effectuer une comparaison similaire pour la période analysée dans la présente étude, bien que la concordance avec les données historiques de la NASA (comme sur les figures 4.8 à .10) soit quand même utile comme référence.

## 5 Références

BAD, 2010 : Stratégie de développement de la maîtrise de l'énergie au Mali. Groupe de la Banque Africaine de Développement (BAD)

MMEE, 2007 : Stratégie nationale pour le développement des énergies renouvelables. Ministère des Mines, de l'Énergie et de l'Eau (MMEE)

### Chapitres 2 et 3, Ressources éoliennes

Adrian, G., 1994: Zur Dynamik des Windfeldes über orographisch gegliedertem Gelände, Ber Deutschen Wetterdienstes 188, Offenbach am Main 1994, 142 pp.

Adrian, G., F. Fiedler, 1991: Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. *Beitr. Phys. Atmosph.*, 64:27-48

Frank, H. P., L. Landberg, 1997: Modelling the wind climate of Ireland. *Boundary-Layer Meteorology*, 85:359-378

Badger, J, X. G. Larsén, A. N. Hahmann, N. G. Mortensen, J. C. Hansen, Rong, Zhu; Zhenbin, Yang; Chunhong, Yuan. Methods to assess uncertainty of wind resource estimates determined by mesoscale modelling. EWEA Annual Event 2011. Brussels (BE), 14-17 Mar, 2011. In proceedings 5 pages p.

Frank, H. P., O. Rathmann, N. G. Mortensen, L. Landberg, 2001: The Numerical Wind Atlas – the KAMM/WAsP Method, Risoe National Laboratory, Roskilde, Denmark. ISBN 87-550-2850-0, Risø-R-1252(EN).

Frank, H. P., L. Landberg, 1997. Modelling the wind climate of Ireland. *Boundary-Layer Meteorology*, 85:359-378

Frey-Buness, F., D. Heimann, R. Sausen, 1995. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations. *Theor. Appl. Climatol.*, 50:117-131

Kalnay E, Kanamitsou M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Irebell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Huggins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* **77**: 437-471

Klemp, J.B., D.R. Durran, 1983. An upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models. *Mon. Wea. Rev.* 1983, 111, 430-444.

Mortensen, N.G., J.C. Hansen, J. Badger, B.H. Jørgensen, C.B. Hasager, L. Georgy Youssef, U. Said Said, A. Abd El-Salam Moussa, M. Akmal Mahmoud, A. El Sayed Yousef, A. Mahmoud Awad, M. Abd-El Raheem Ahmed, M. A.M. Sayed, M. Hussein Korany, M. Abd-El Baky Tarad, 2005. Wind Atlas for Egypt, Measurements and Modelling 1991-2005. New and Renewable Energy Authority, Egyptian Meteorological Authority and Risø National Laboratory. ISBN 87-550-3493-4. 258 pp.

Mortensen, N.G., D.N. Heathfield, L. Myllerup, L. Landberg and O. Rathmann, 2007: Wind Atlas Analysis and Application Program: WAsP 9 Help Facility. Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark. 353 topics. ISBN 978-87-550-3607-9.

Kamissoko, 2008. Rapport de Mission: Relatif à l'installation de quatre (4) équipements de mesure dans le cadre du Projet d'Etudes du Gisement Eolien de Tombouctou (PEGET), CNESOLER, Mali

Kamissoko, 2009a. Rapport de Mission: Relatif à l'acheminement et l'installation de deux (2) équipements de mesure dans le cadre du Projet d'Etudes du Gisement Eolien de Tombouctou (PEGET), CNESOLER, Mali

Kamissoko, 2009b. Rapport des activités du projet d'études du gisement éolien de Tombouctou. CNESOLER, Mali

Kamissoko, 2010. Rapport de Mission : Relatif à l'implantation de quatre (04) mâts de mesure du vent et du rayonnement solaire, CNESOLER, Mali

Troen, I., E. L. Petersen, 1989. European Wind Atlas. Risø National Laboratory for the Commission of the European Communities, Roskilde, Denmark, ISBN 87-550-1482-8.

### **Liens Internet**

[1] <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov>

[2] <http://edcsns17.cr.usgs.gov/glcc/>

[3] <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/>

## **Chapitre 4, Ressources solaires**

EUMETSAT, 2011. Product User Manual Down-welling Surface Shortwave Flux (DSSF), Issue 2.6v2.

EUMETSAT, 2011. Validation Report. Down-welling Surface Shortwave Flux (DSSF), Issue I/2011 v4

Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., Ratier, A., 2002. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). Bulletin of the American Meteorological Society 83, 977-992.

### **Liens Internet**

[1] <http://landsaf.meteo.pt/>

[2] <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

## **ANNEXE A : Vue d'ensemble du chronométrage des mesures**

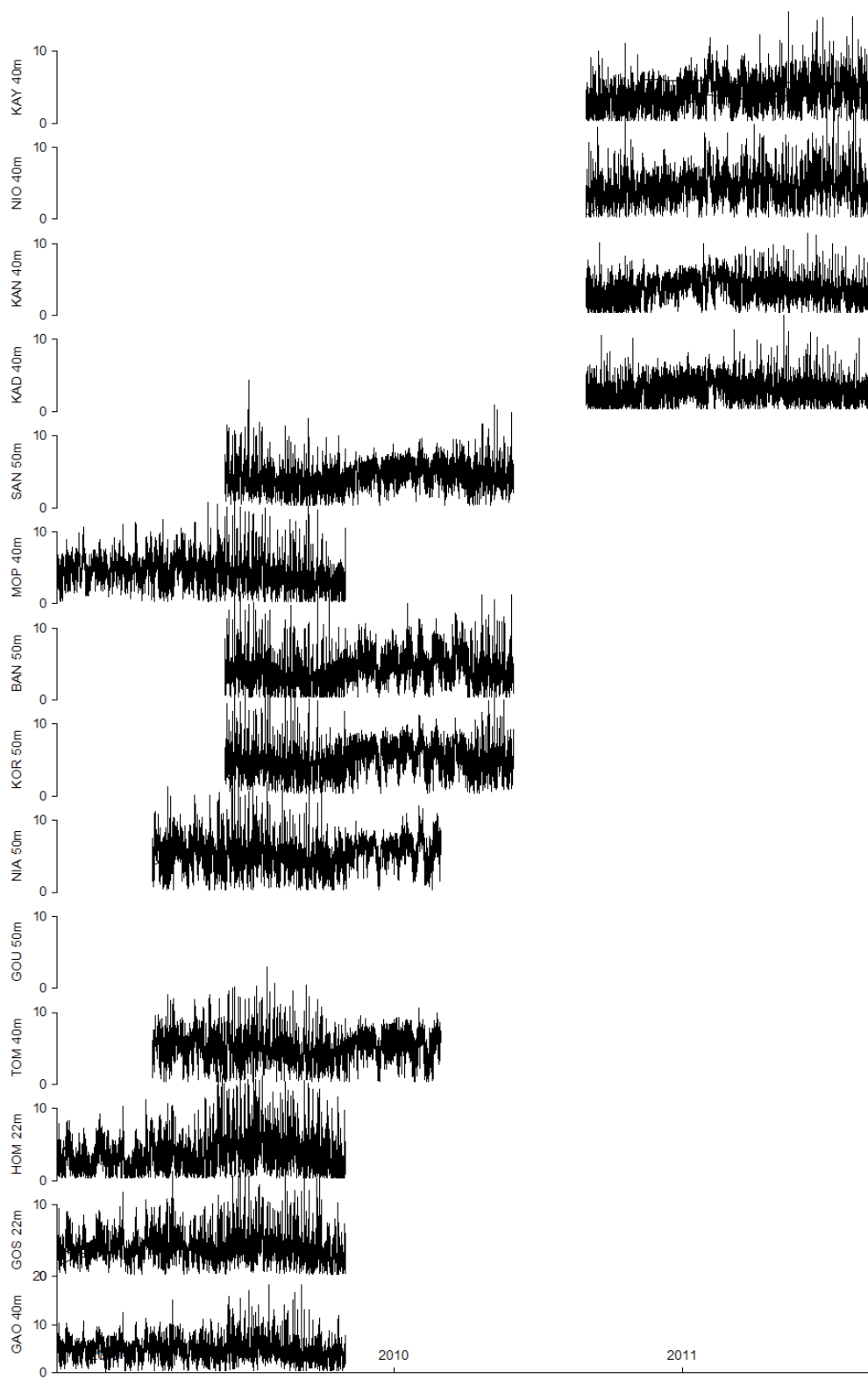


Figure 5.1 : Vue d'ensemble du chronométrage des mesures. (Source des données : CNESOLER, 2012)



## ANNEXE B : Vitesse du vent et rayonnement solaire mesurés

Nous avons effectué quatre tracés des statistiques de vent en utilisant une année de données fournies par chaque station :

- Les distributions de la fréquence des directions du vent (rose des vents), divisées en 12 secteurs de direction du vent.
- Les distributions de la fréquence des vitesses du vent (histogramme), divisées en groupes de vitesse de vent de 1 m/s, avec indication des paramètres de la fonction de distribution de Weibull correspondante (A et k), de la vitesse moyenne du vent (U) et de la densité d'énergie électrique (P) pour la densité de l'air standard ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ).
- Les variations sur l'année des vitesses de vent moyennes mensuelles (bleu), des intensités des turbulences (bleu discontinu) et des densités d'énergie électrique (rouge) (@  $1 \text{ kg/m}^3$  densité de l'air).
- Les variations moyennes mensuelles sur la journée des vitesses de vent moyennes par heure (bleu) et des densités d'énergie électrique (rouge) sur deux mois sélectionnés, à savoir les mois ayant la densité moyenne d'énergie électrique la plus élevée (trait plein) et la plus faible (pointillé).

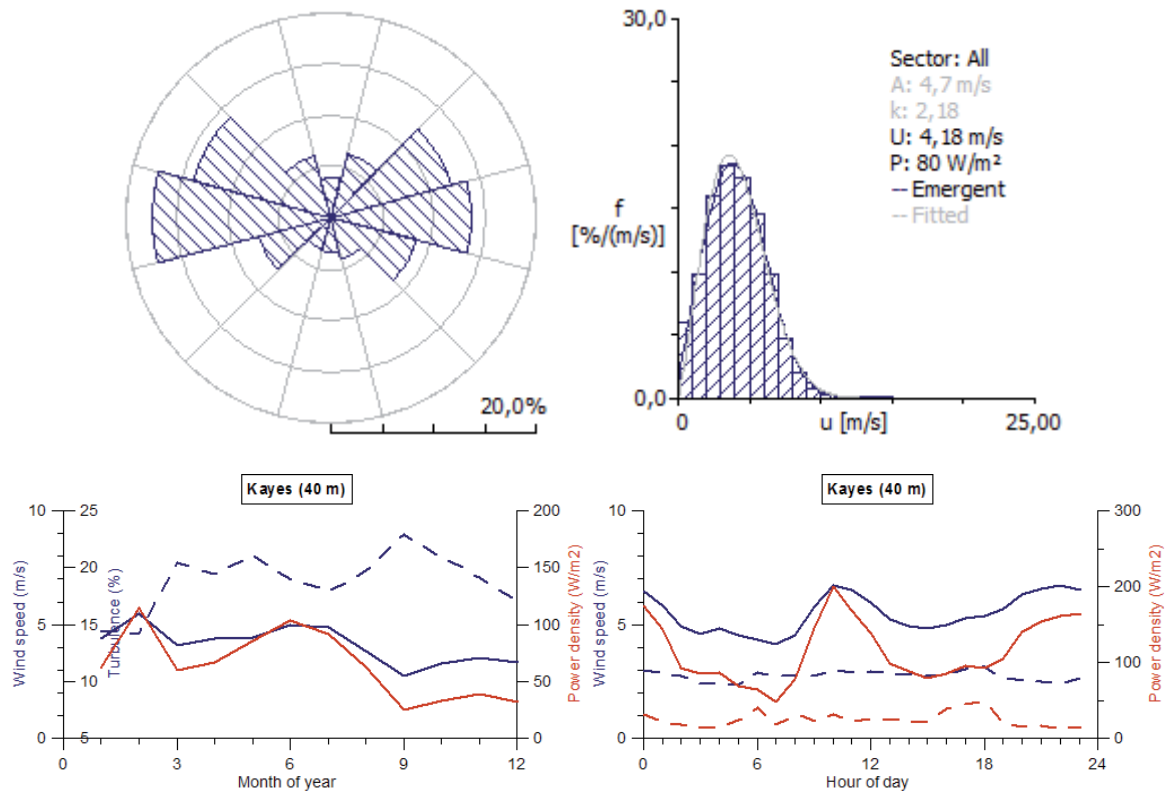
En outre, deux tracés des statistiques du rayonnement solaire ont été réalisés pour les stations avec les données de rayonnement solaire :

- Les variations sur l'année des rayonnements solaires mensuels moyens et maximum, et les températures de l'air mensuelles moyennes.
- Les variations moyennes mensuelles sur la journée des rayonnements solaires moyens et des températures de l'air par heure pour les mois de janvier et juillet.

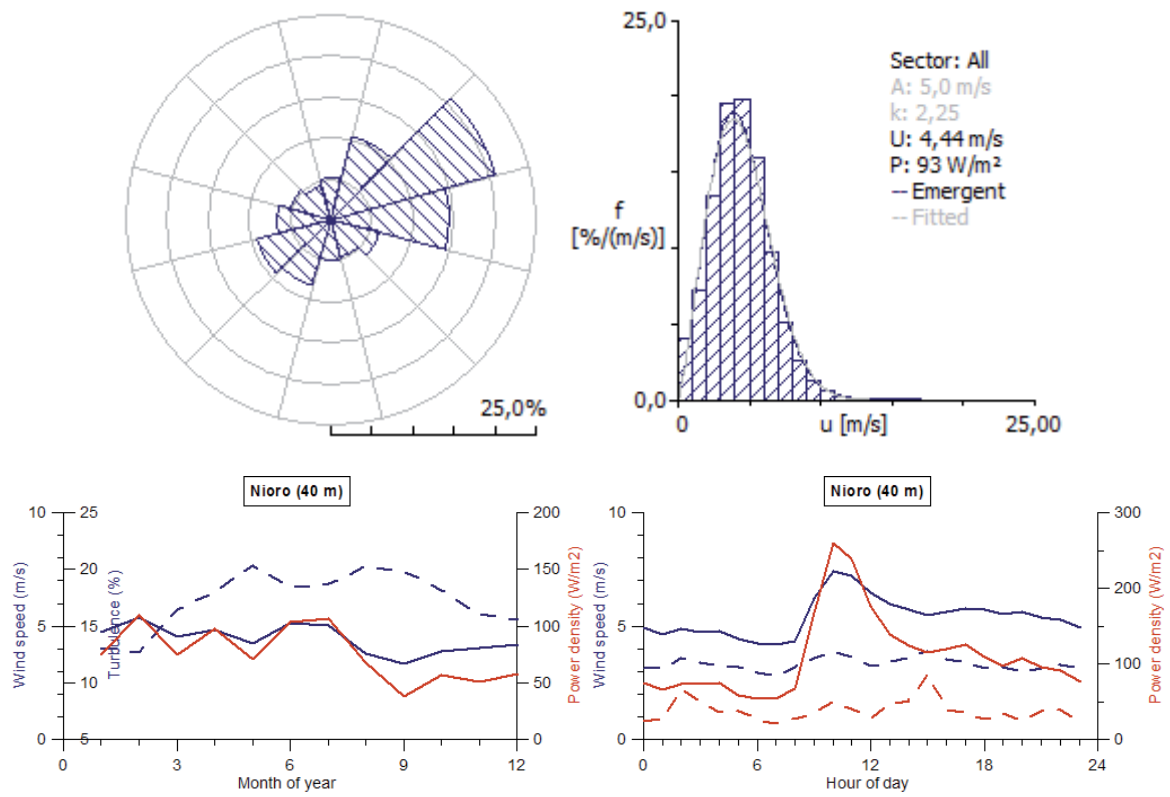
Les stations sont classées en fonction de leur localisation, en allant de l'est vers l'ouest :

- Kayes
- Nioro
- Kangaba
- Kadiolo
- San
- Mopti
- Bandiagara
- Koro
- Niafunké
- Goundam
- Tombouctou
- Hombori
- Gossi
- Gao

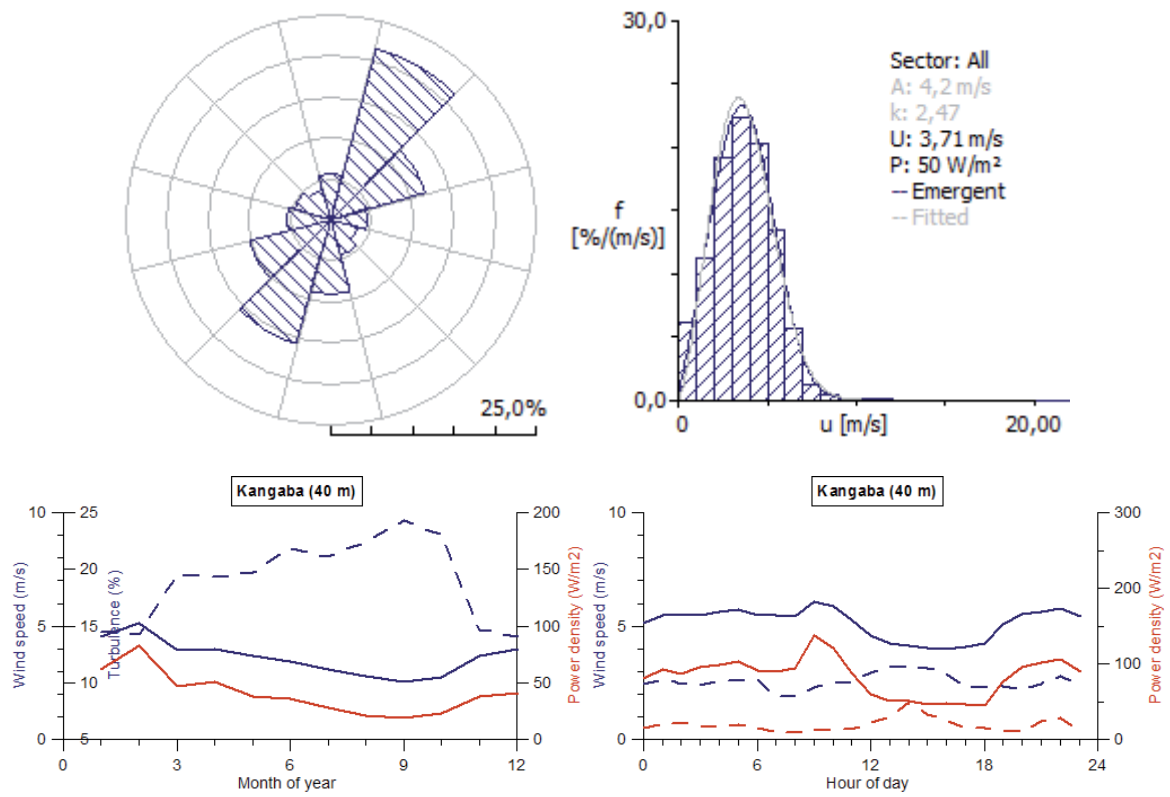
## Kayes



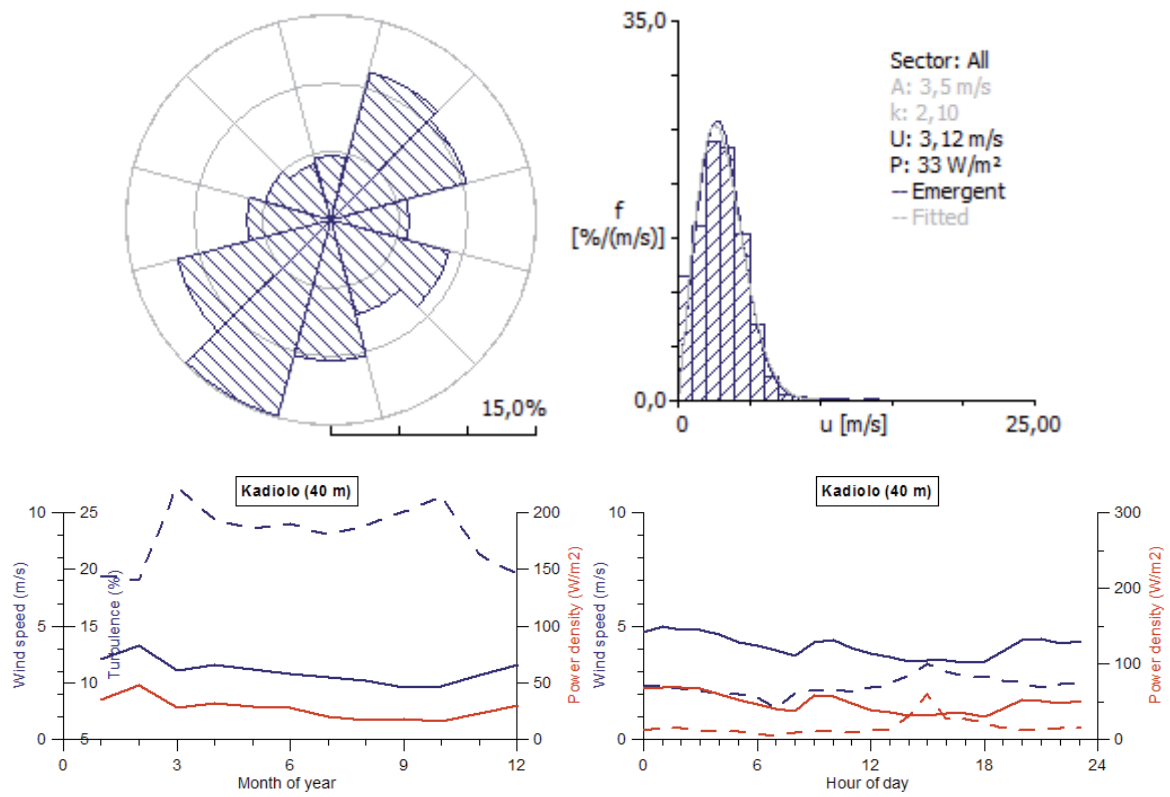
# Nioro



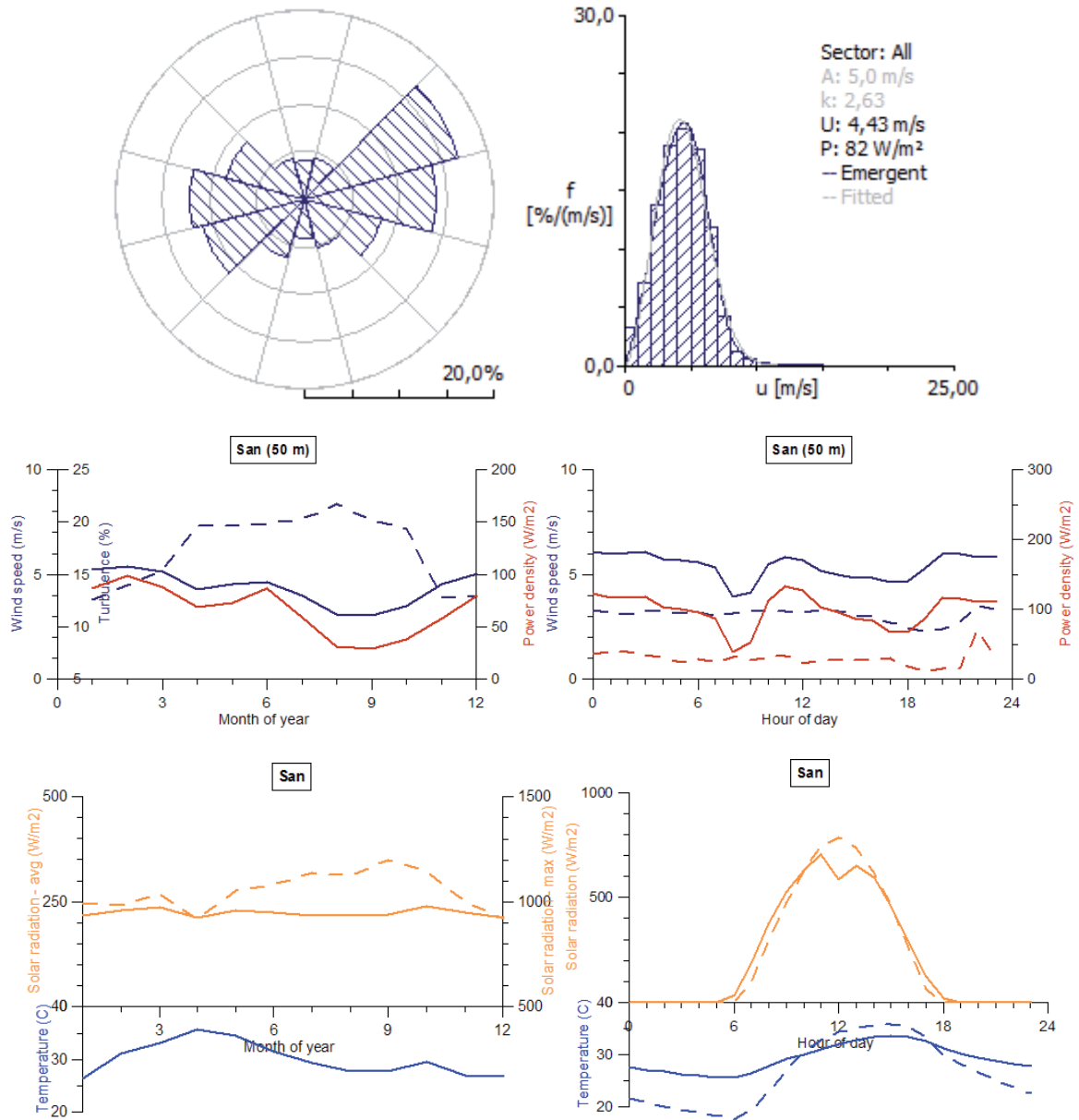
## Kangaba



## Kadiolo

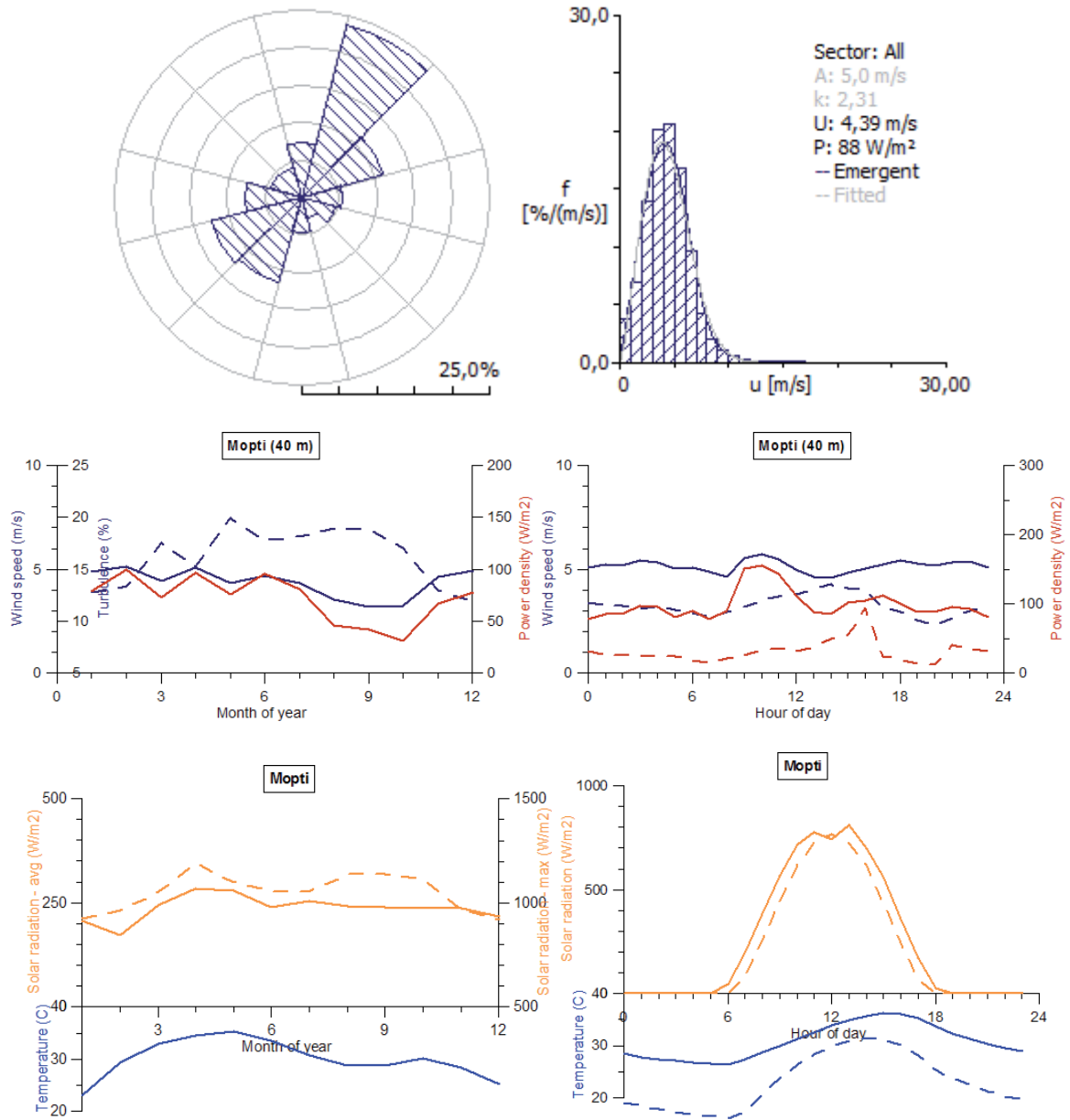


## San

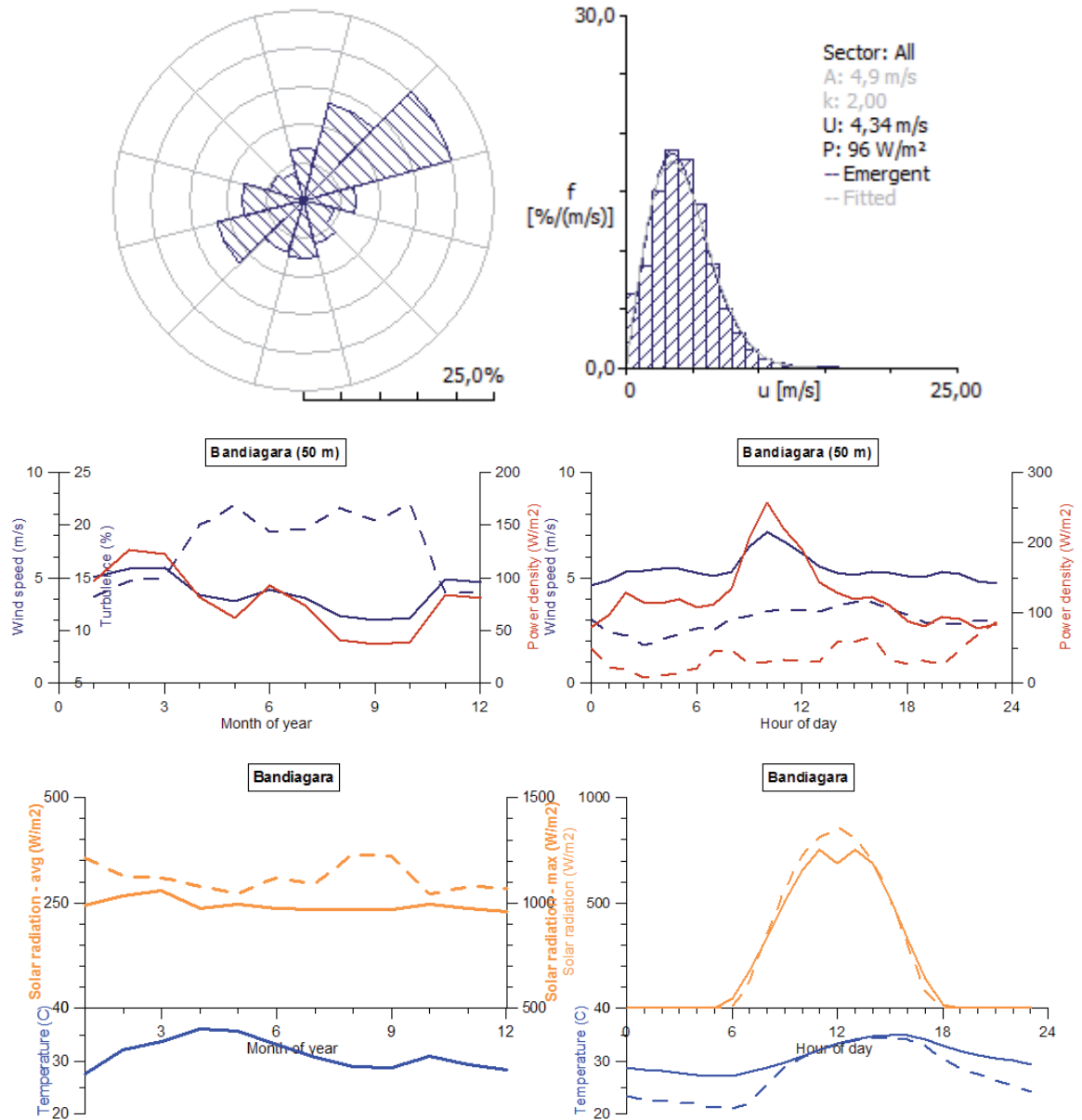




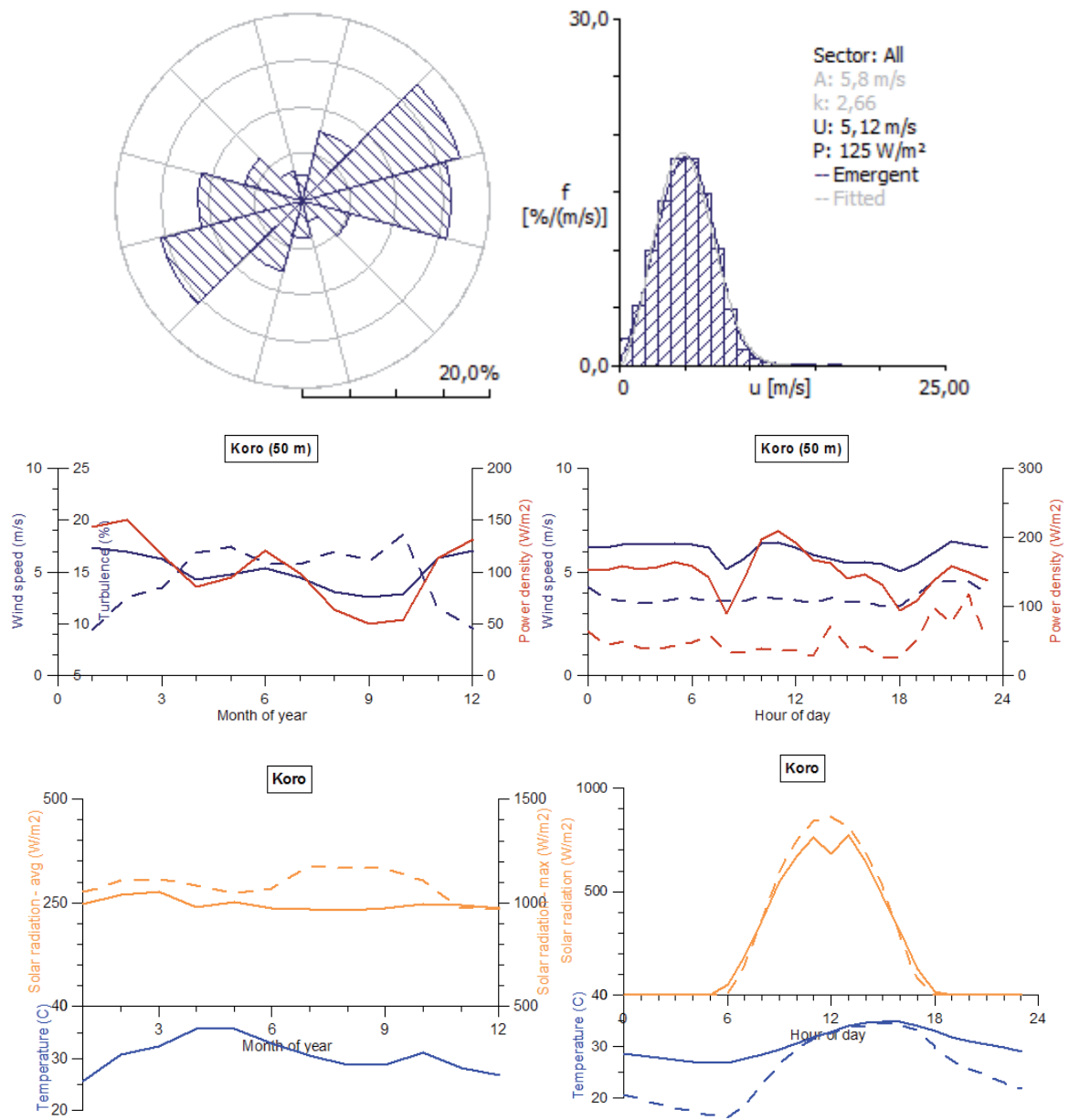
## Mopti



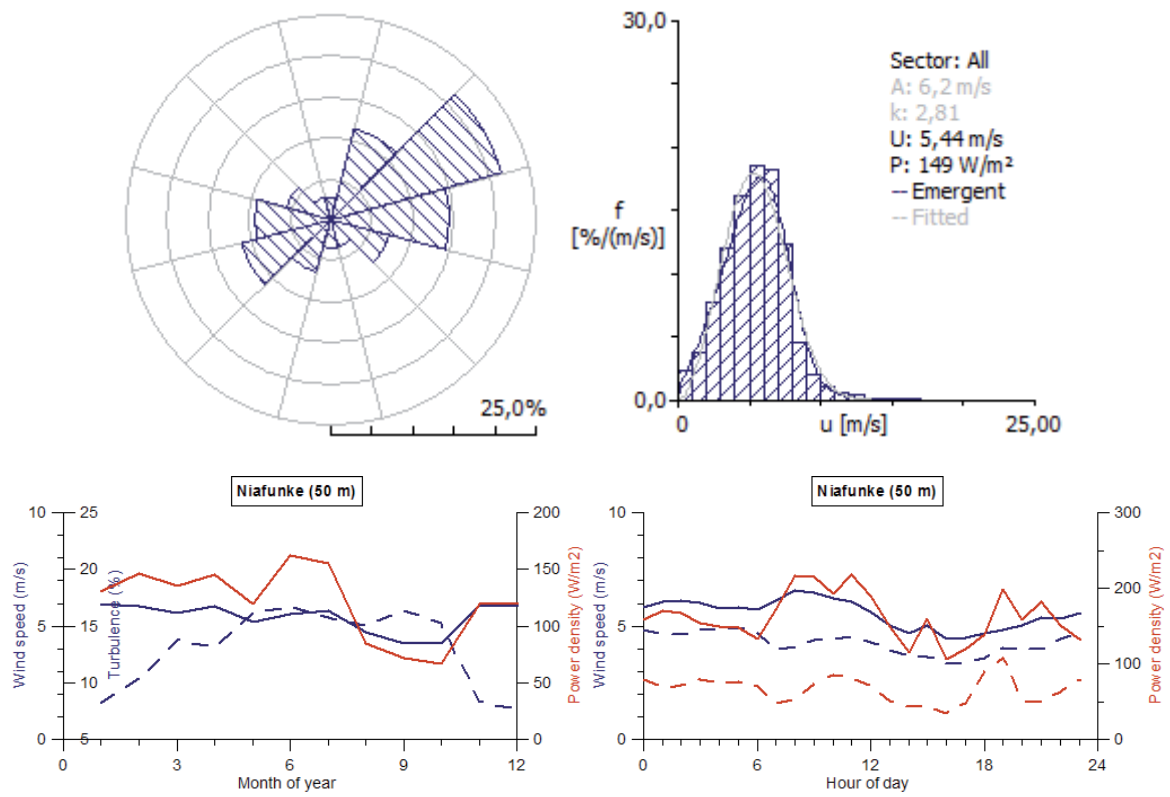
## Bandiagara



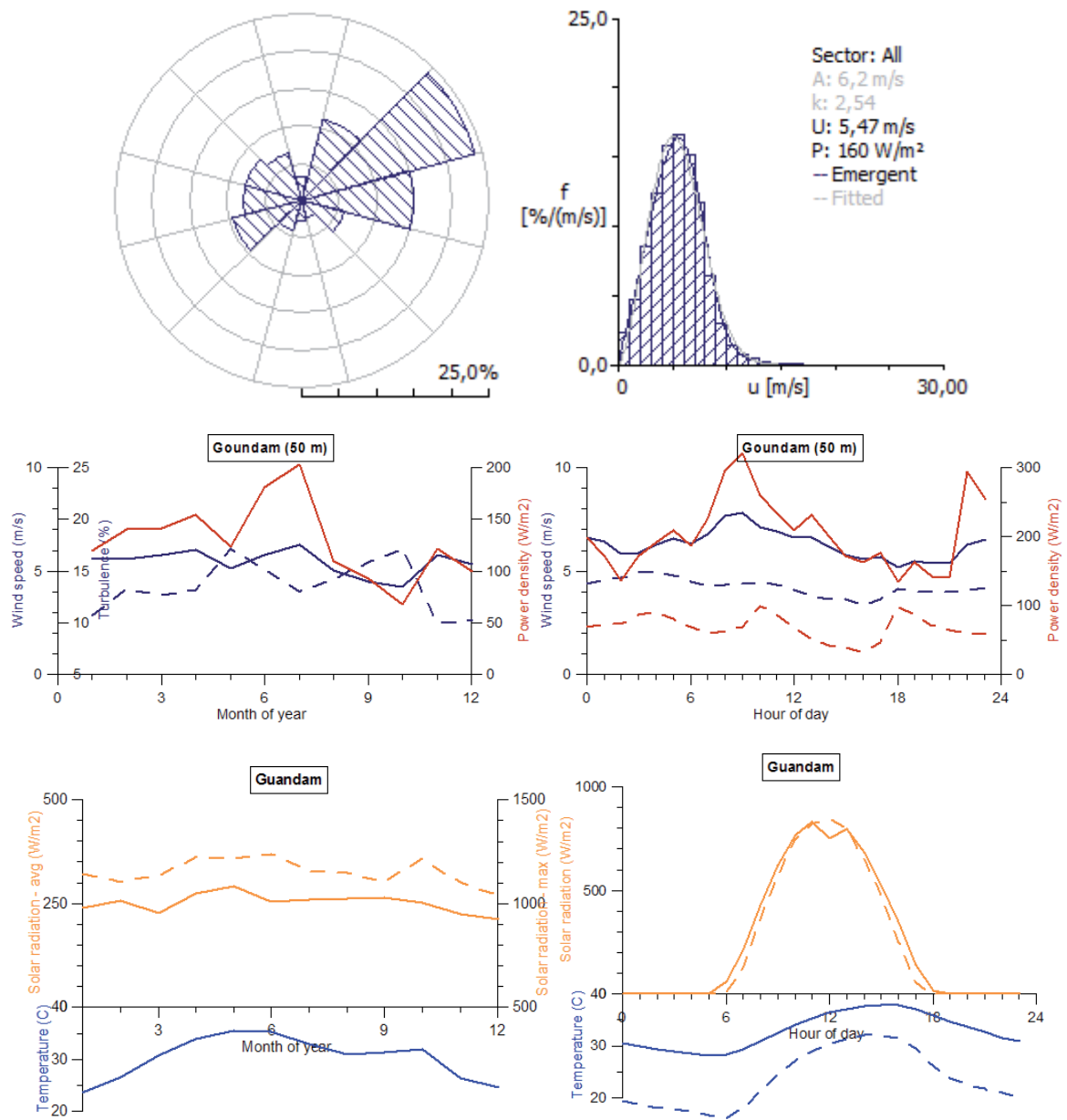
## Koro



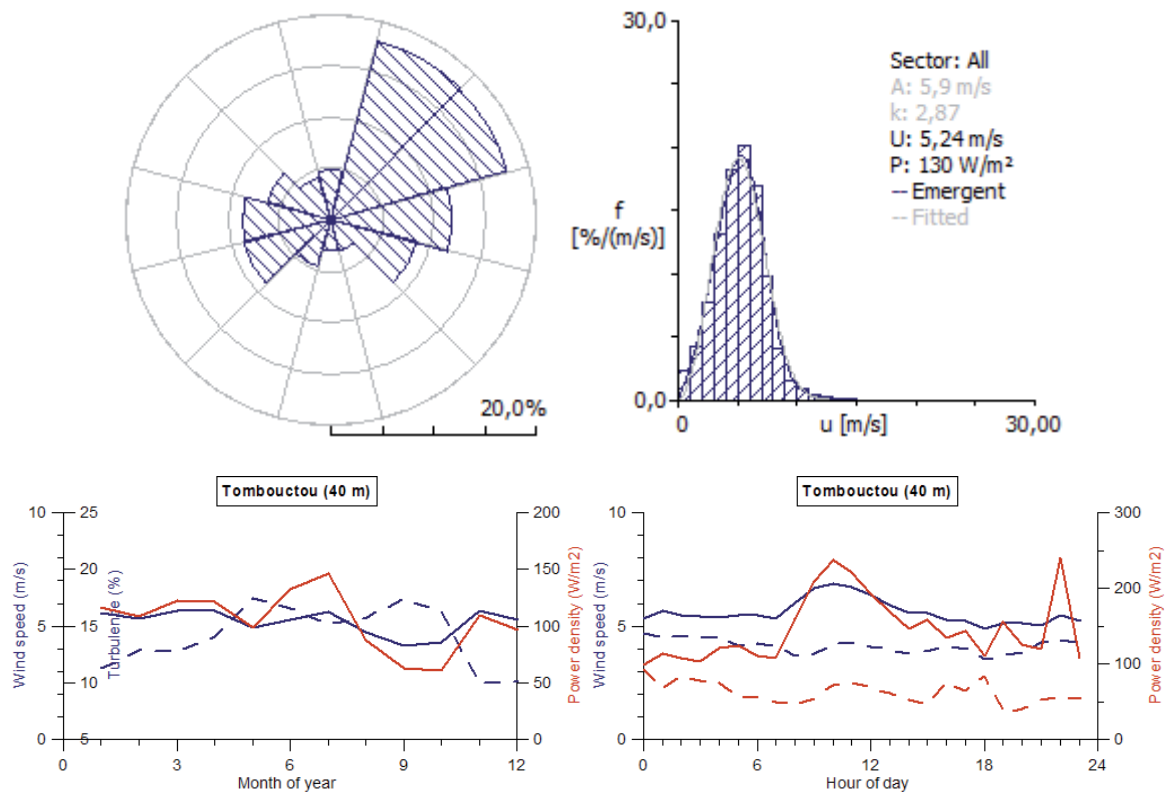
## Niafunké



## Goundam

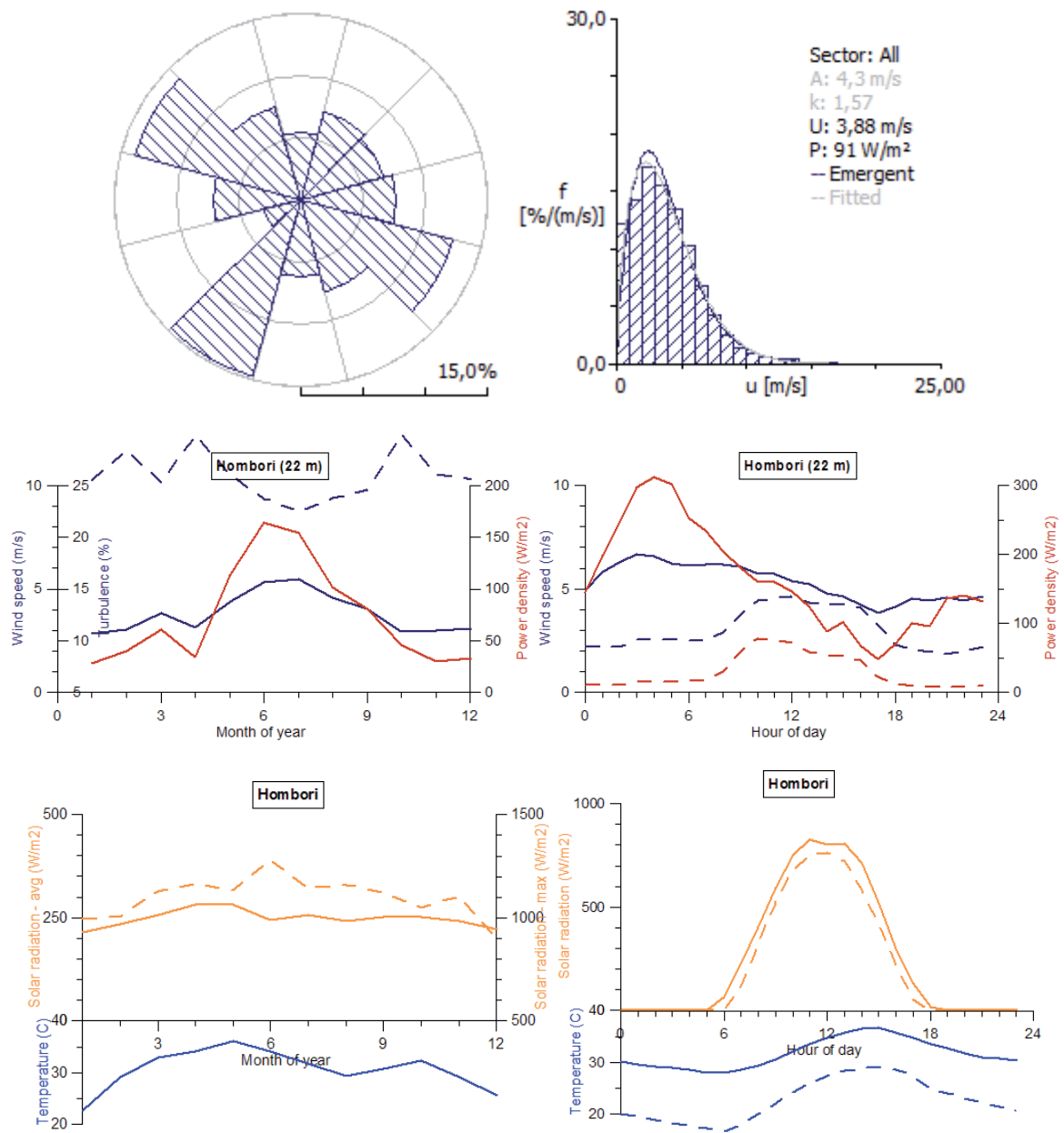


## Tombouctou

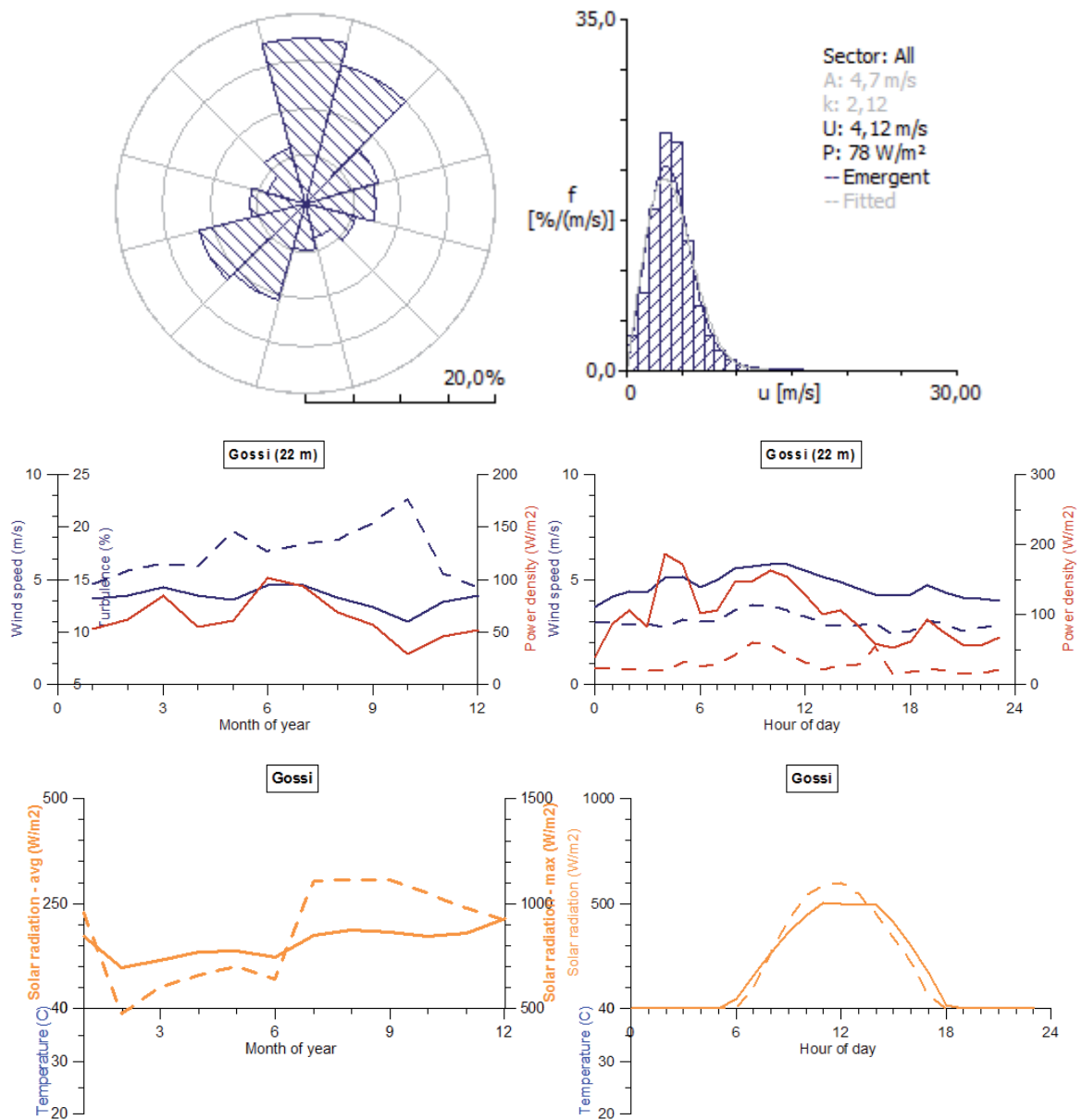




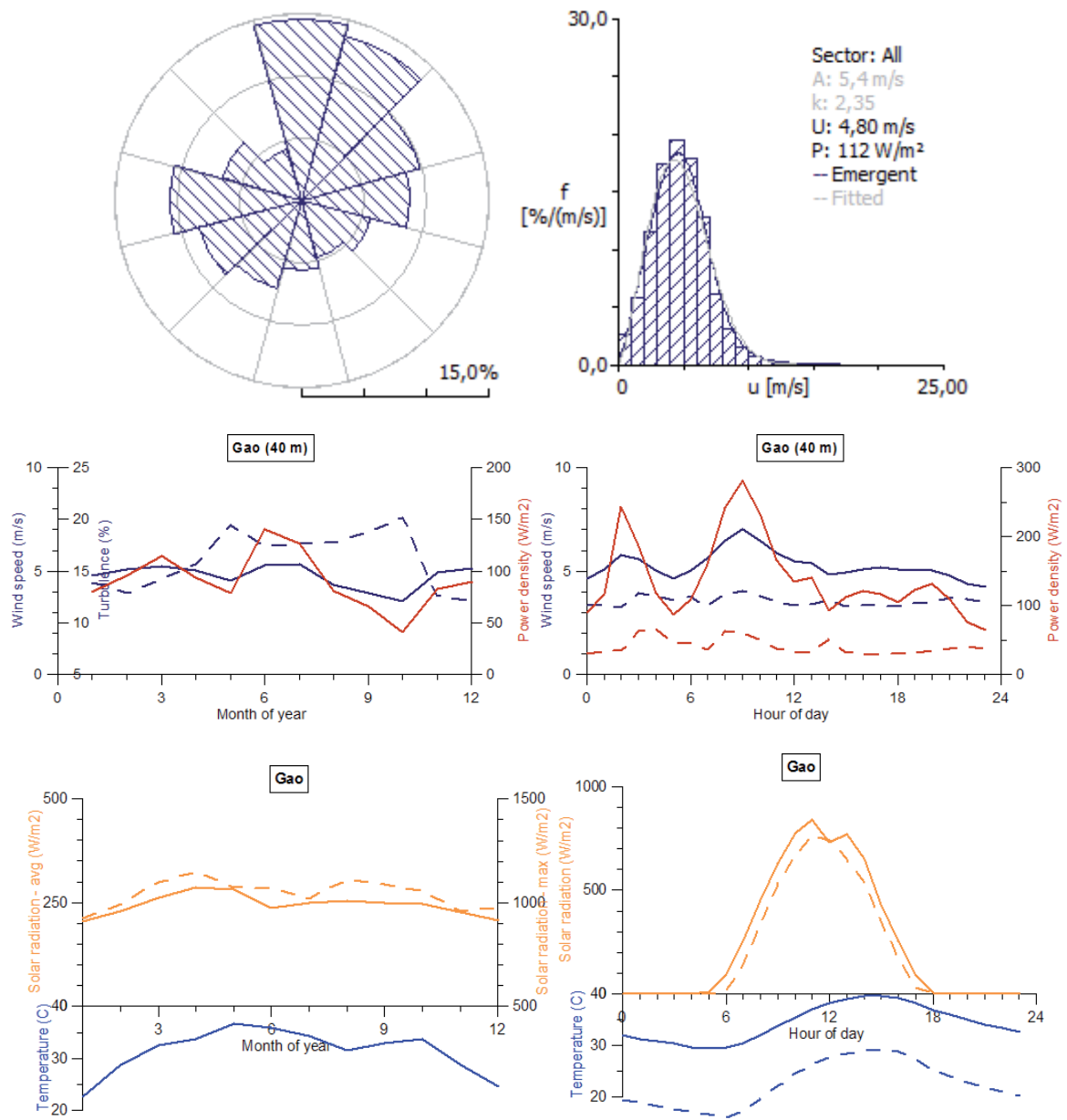
## Hombori



## Gossi



## Gao



## **ANNEXE C : Numéros de série des capteurs**

Les numéros de série des capteurs NRG Systems ® sont les suivants :

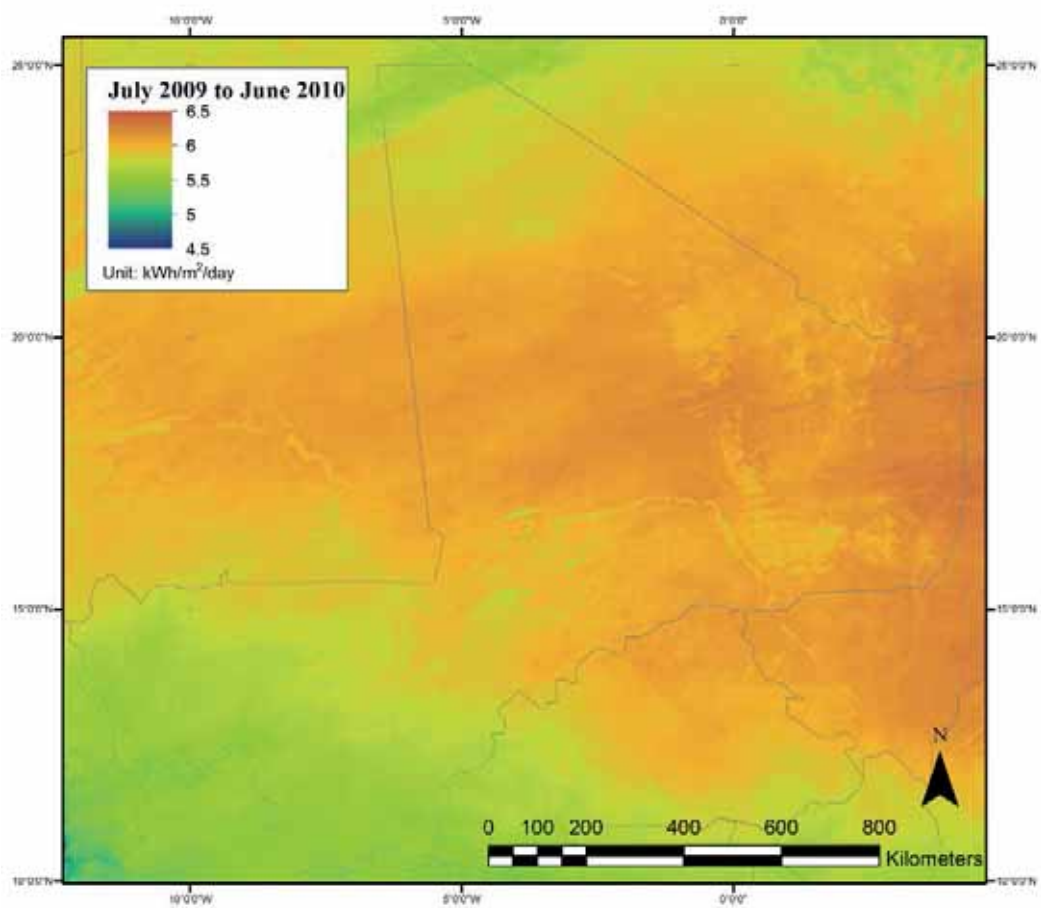
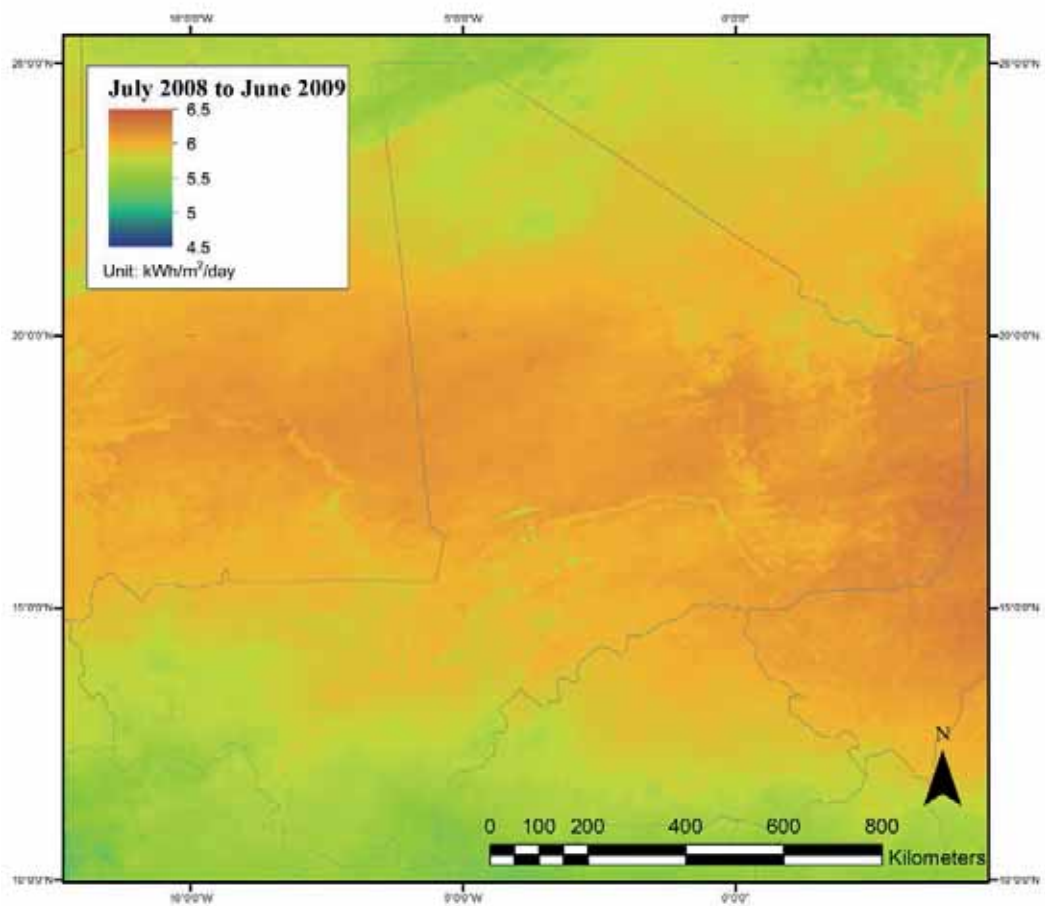
Bandiagara : 95271, 95270, 95269, 95266  
Gao : 42199, 42197, 42188, 42181  
Gossi : 42198, 42191, 42190, 42189  
Goundam : 77737, 77736, 77735, 77734  
Hombori : 42196, 42195, 42194, 42192  
Koro : 95279, 95278, 95256, 95252  
Niafunké : 77739, 77738, 77731, 77730  
San : 95283, 95282, 95280, 95281  
Sévaré : 42212, 42211, 42193, 42200  
Tombouctou : 77733, 77732, 77729, 77728  
Kadiolo : 133776, 133777, 95207, 95208  
Kangaba : 133774, 133773, 133771, 133770  
Kayes : 95201, 95202, 95203, 95204  
Nioro : 95254, 95255, 95210, 95211

## **ANNEXE D : Cartes du rayonnement solaire annuel et mensuel**

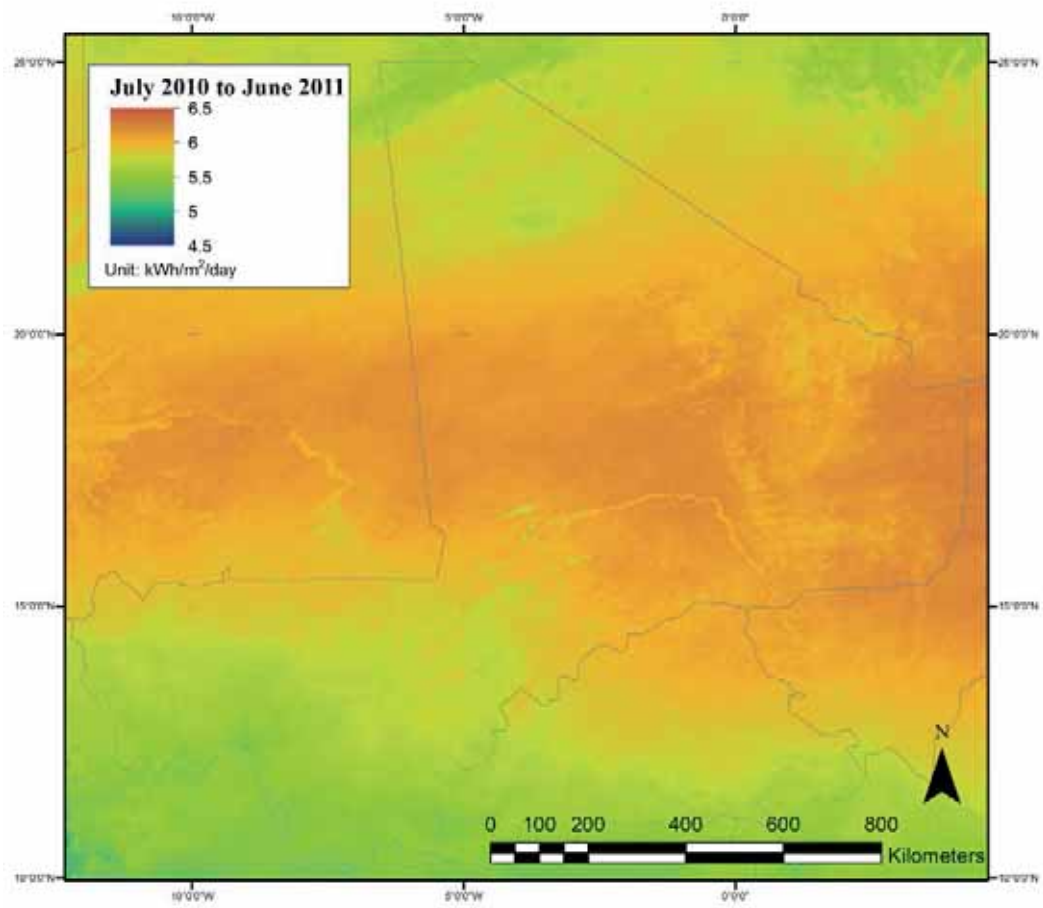
Cette annexe contient des cartes du rayonnement solaire mensuel et annuel.

1. Moyens annuels (par jour) en kWh/m <sup>2</sup> /jour pour les trois années de données (juillet à juin) .....	74
2. Moyens annuels (par jour) en kWh/m <sup>2</sup> /jour pour les années 2009 et 2010 .....	77
3. Moyen quotidien mensuelle en kWh/m <sup>2</sup> /jour pour la période du 01/07/2008 au 30/06/ 2011 .....	79
4. Moyen quotidien mensuel en kWh/m <sup>2</sup> /jour pour les trois années sur lesquelles porte cette étude ....	98
5. Moyen quotidien mensuel en kWh/m <sup>2</sup> /jour, résolution de 1 degré, moyen pour les trois années sur lesquelles porte cette étude.....	105

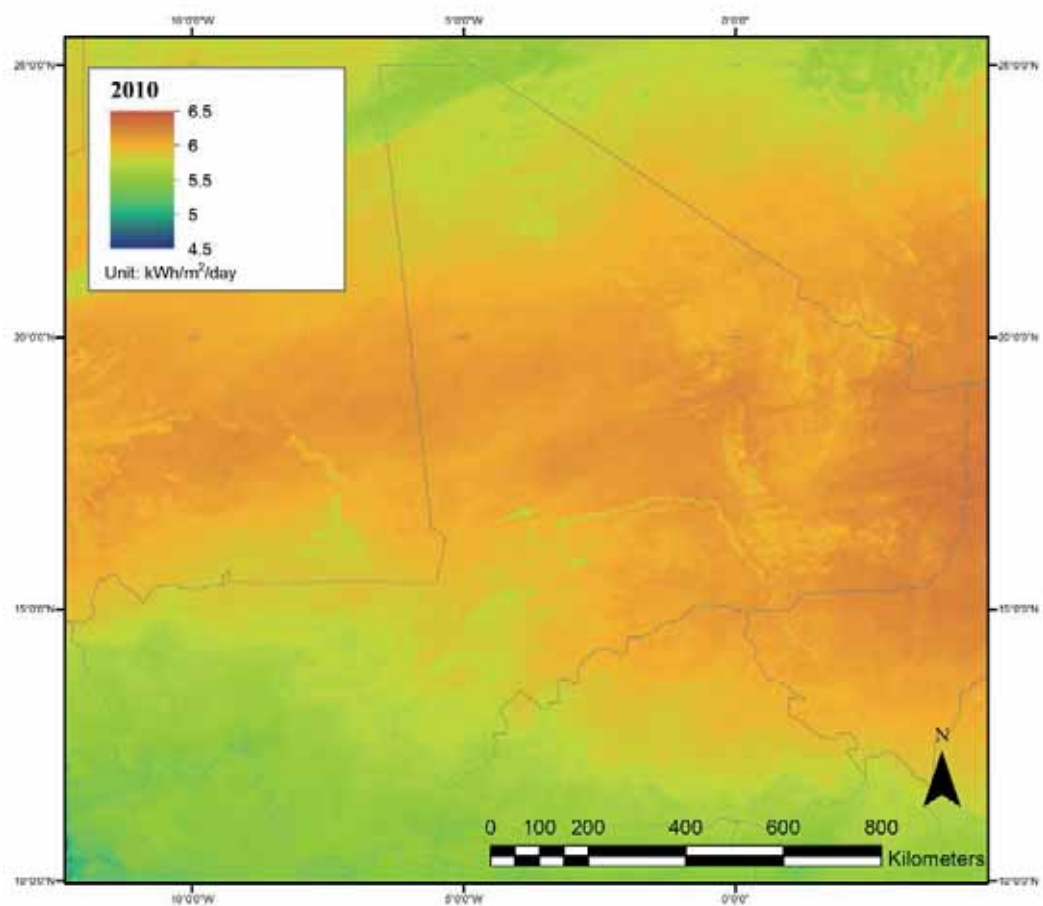
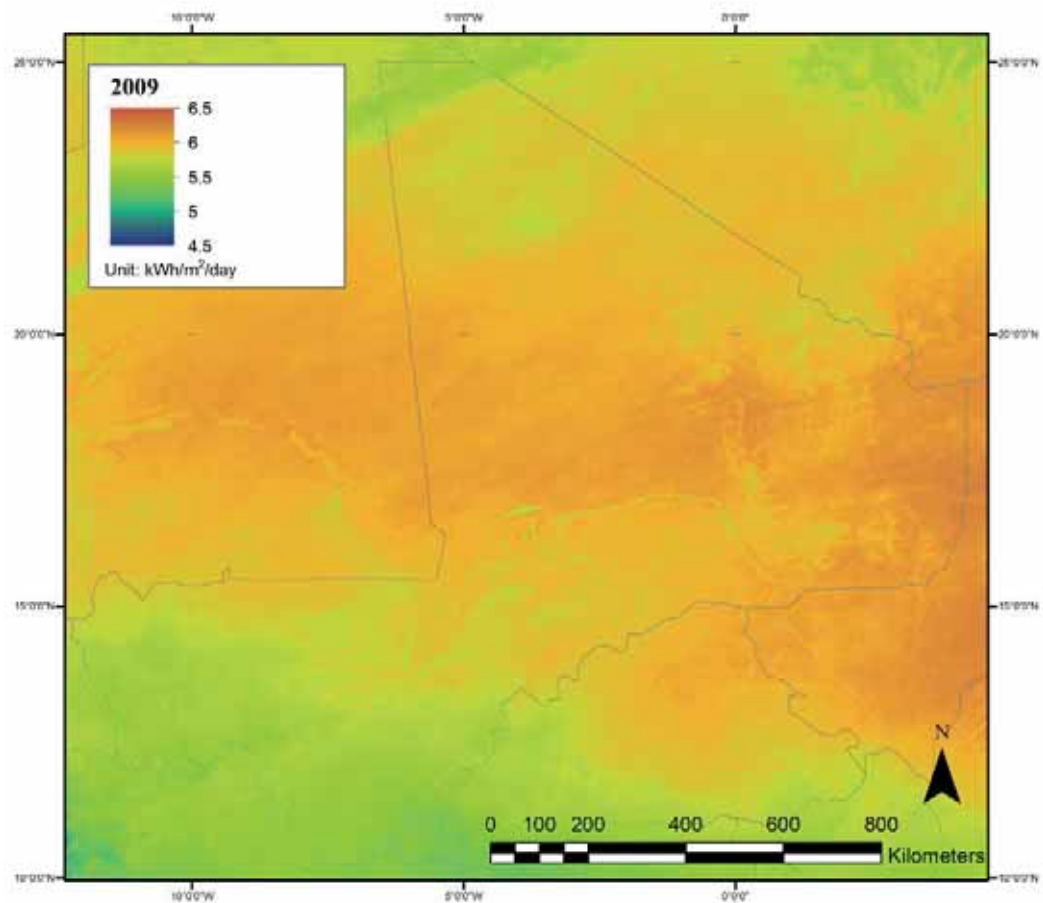
**1. Moyens annuels (par jour) en kWh/m<sup>2</sup>/jour pour les trois années de données (juillet à juin)**



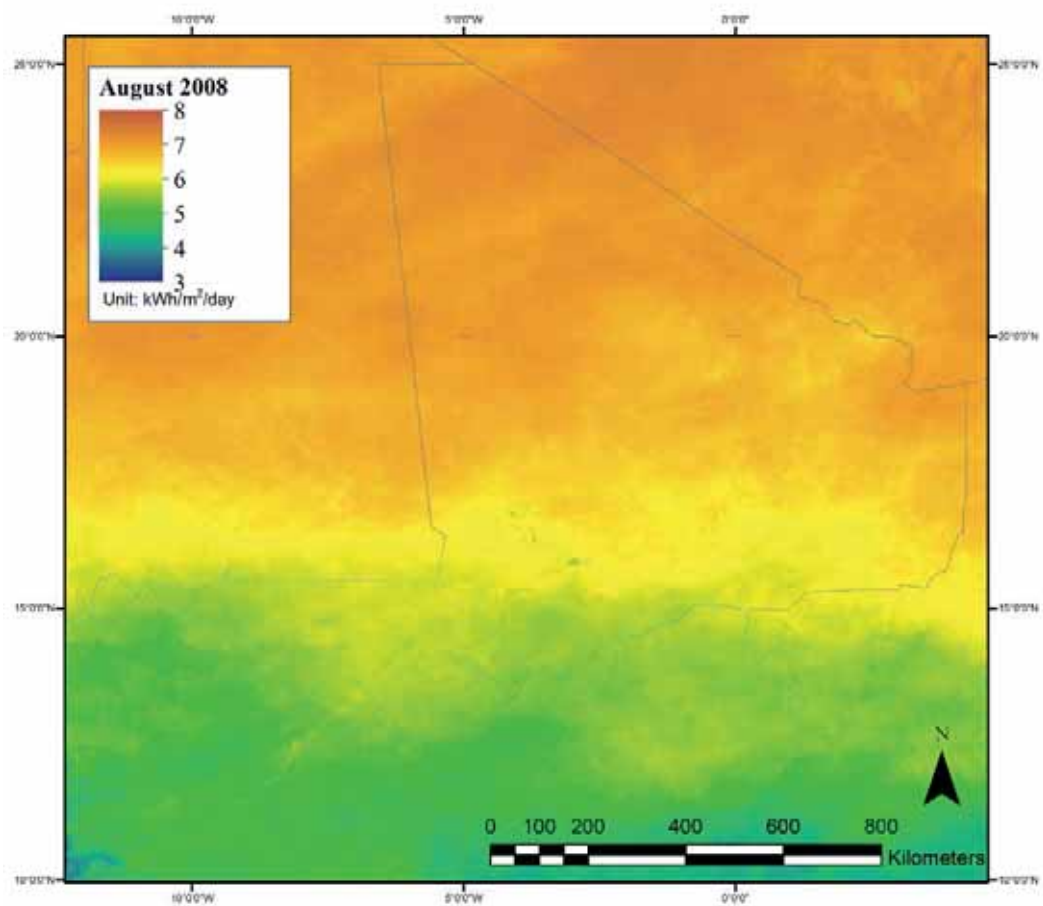
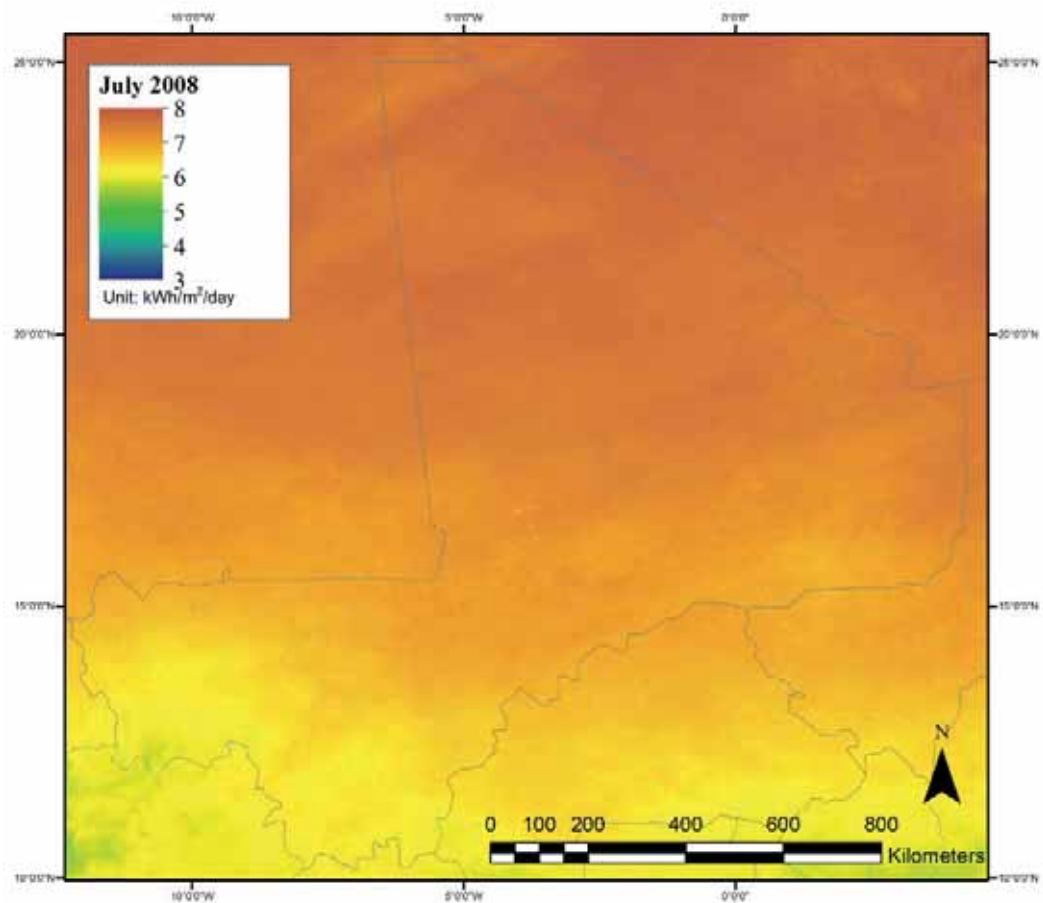


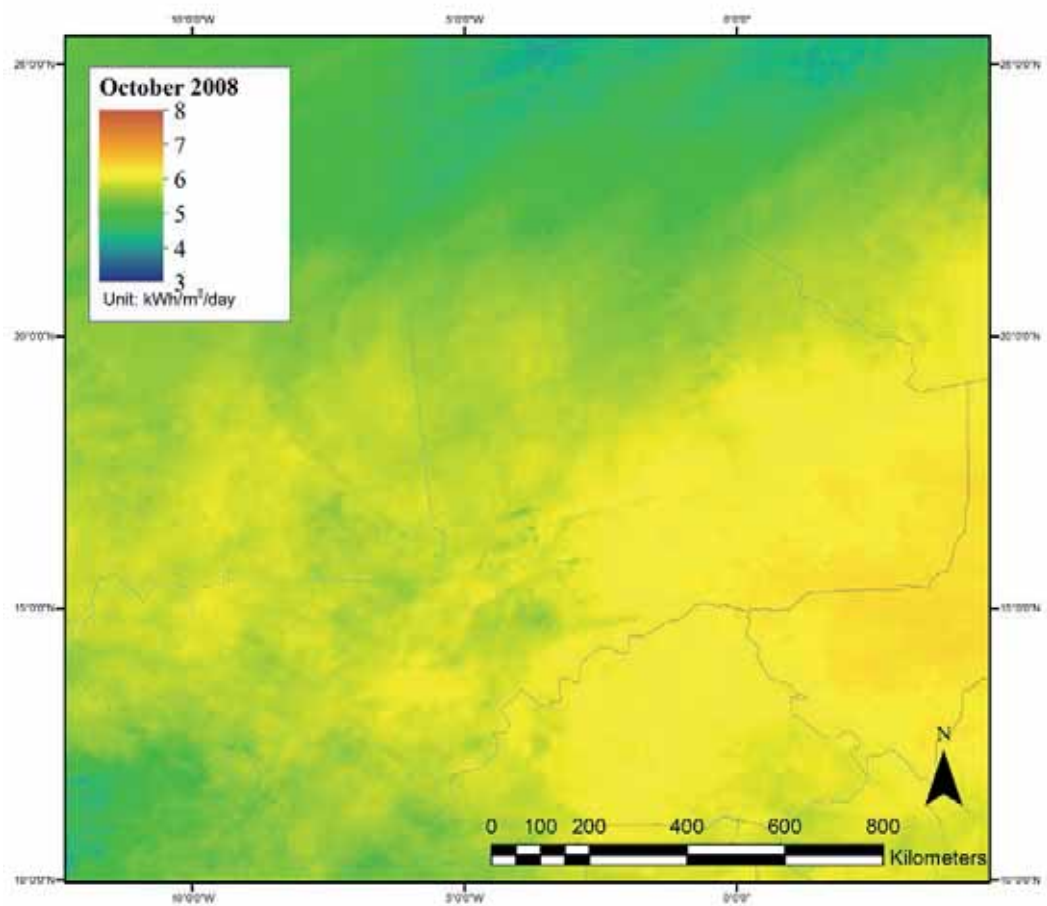
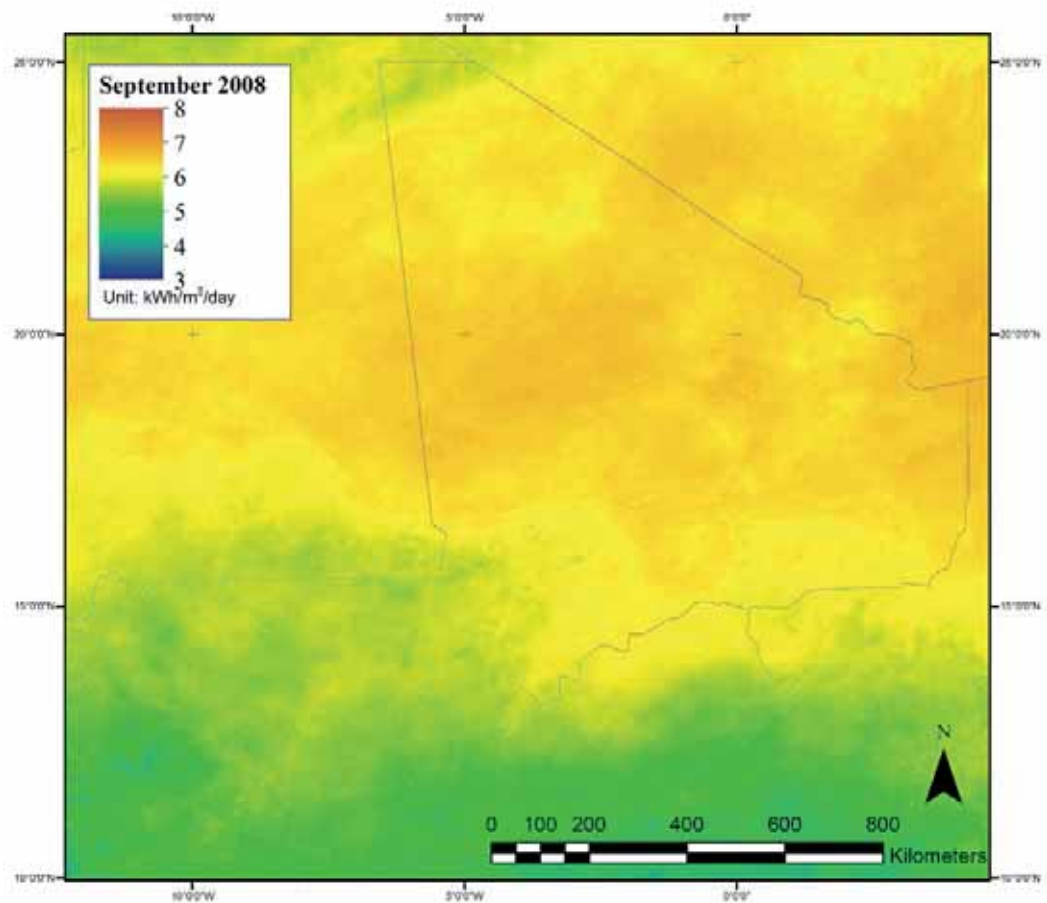


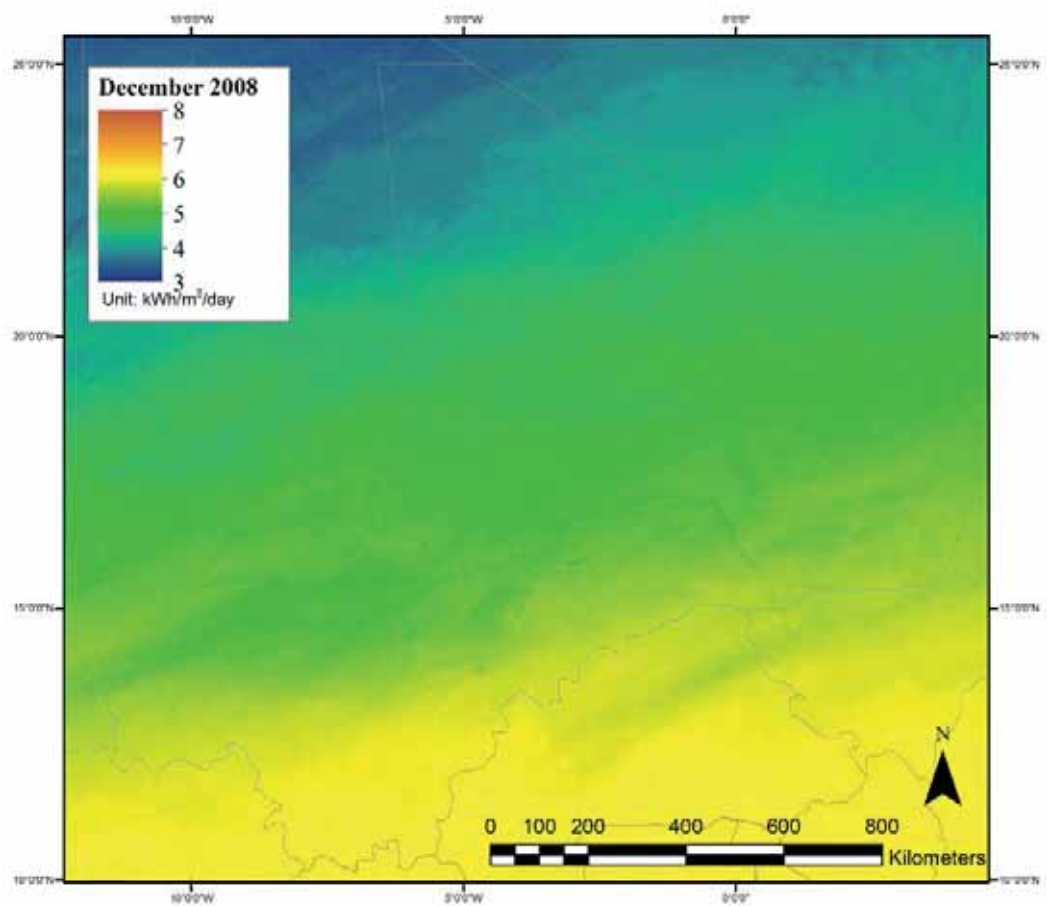
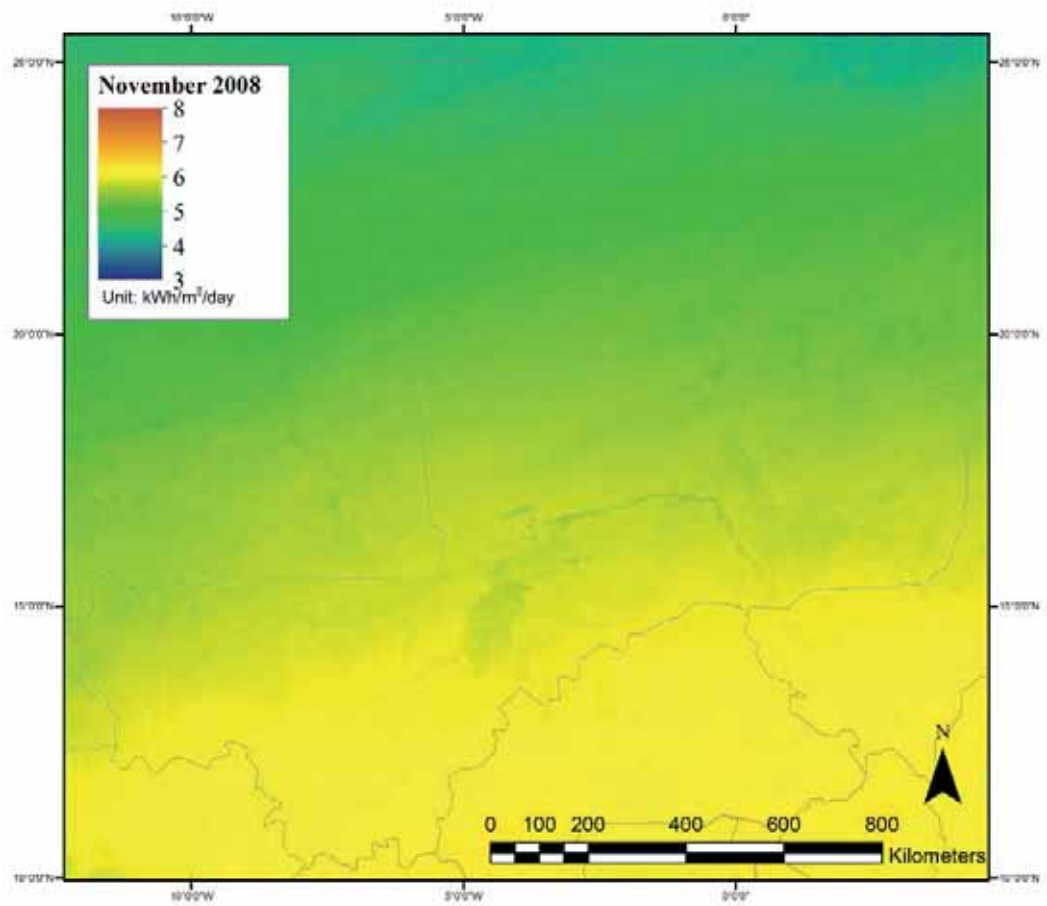
## **2. Moyens annuels (par jour) en kWh/m<sup>2</sup>/jour pour les années 2009 et 2010**



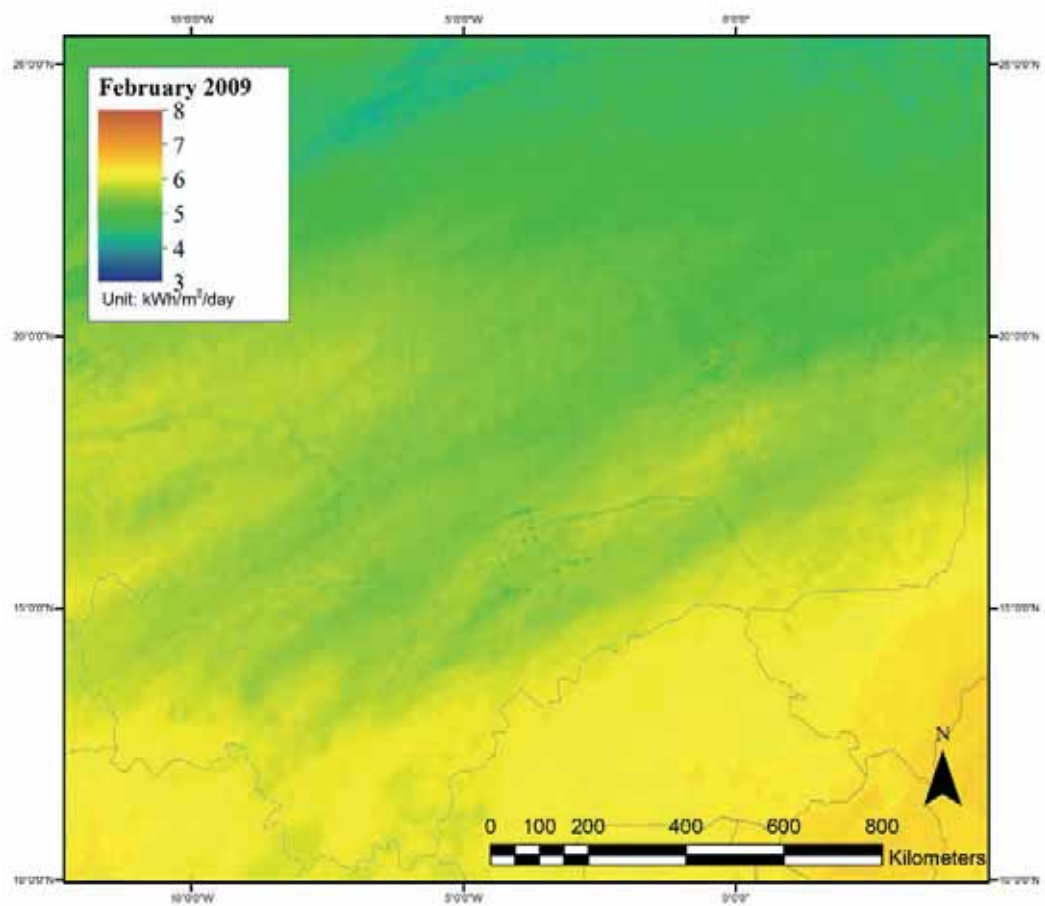
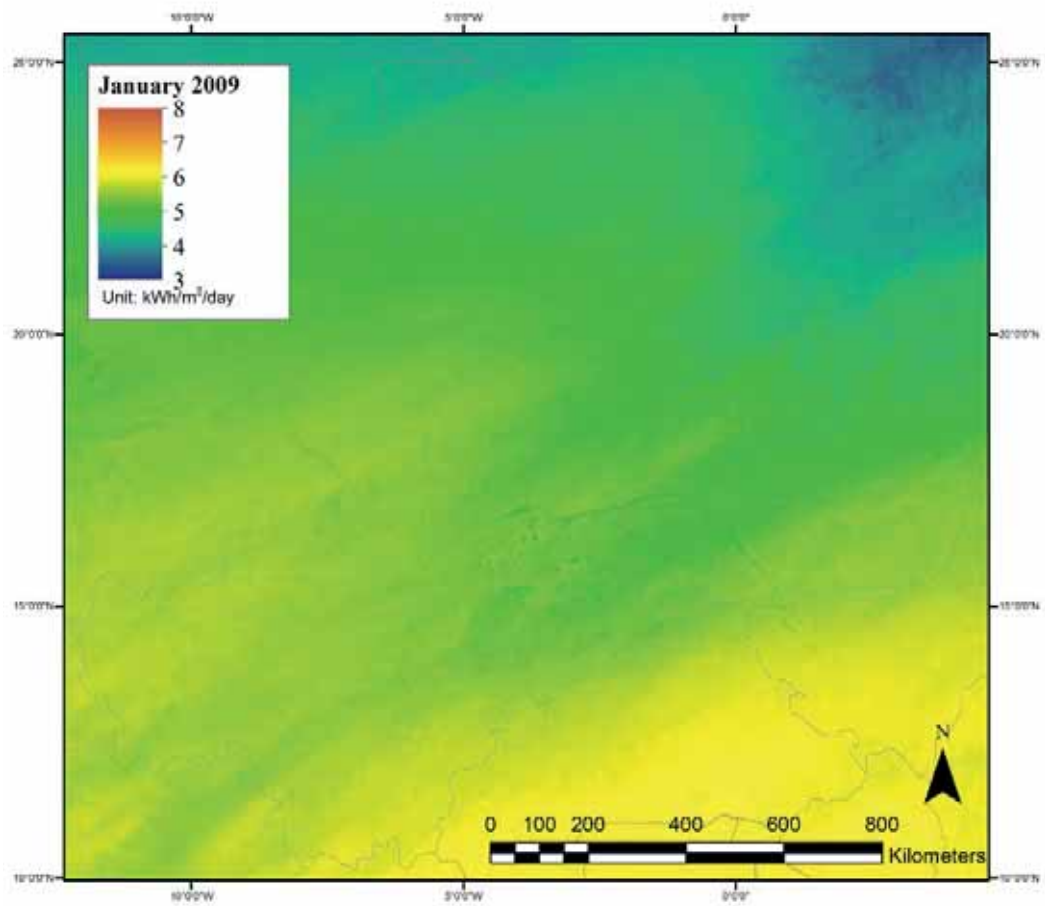
**3. Moyen quotidien mensuelle en kWh/m<sup>2</sup>/jour pour la période du 01/07/2008 au 30/06/ 2011**

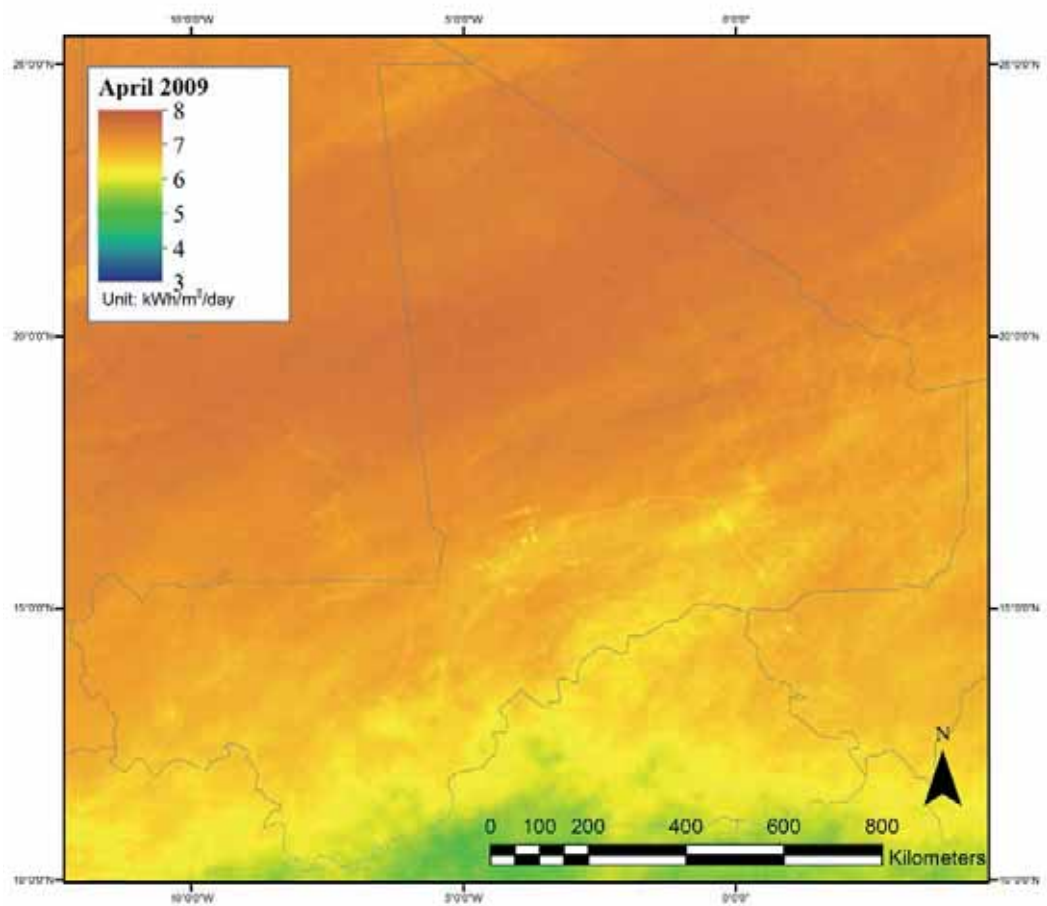
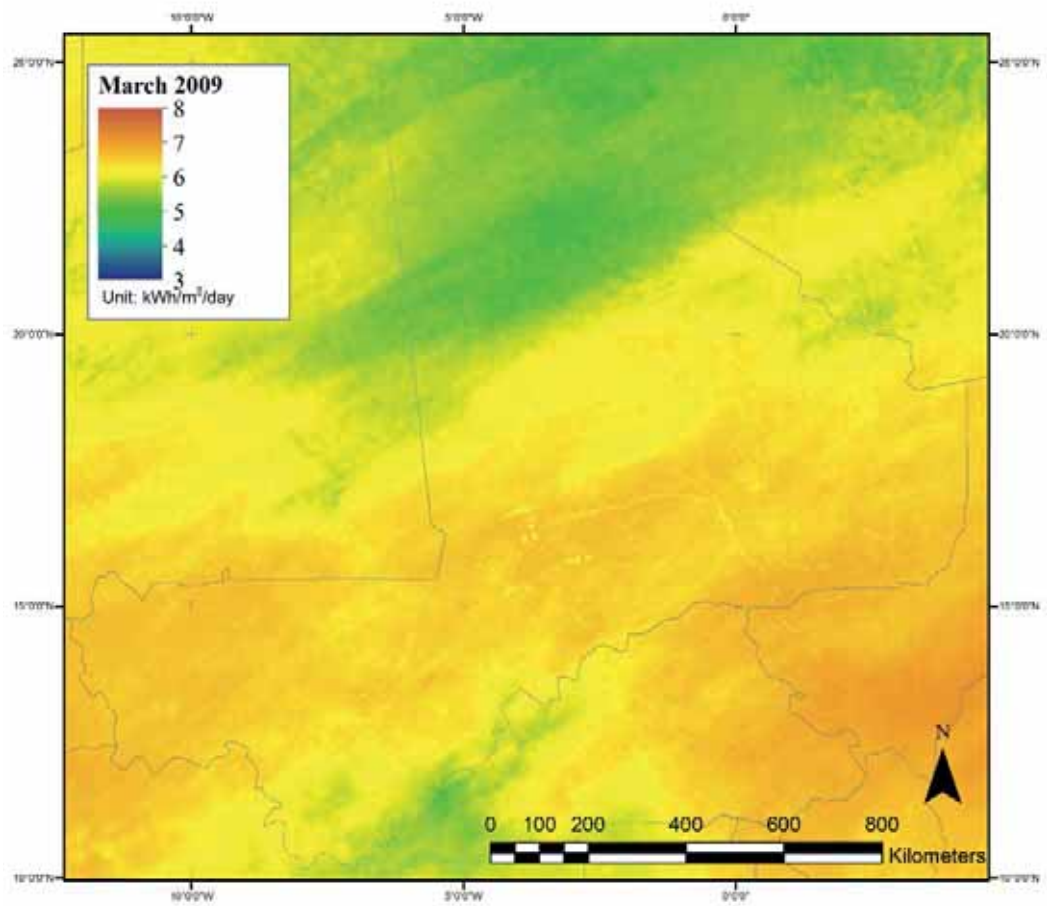


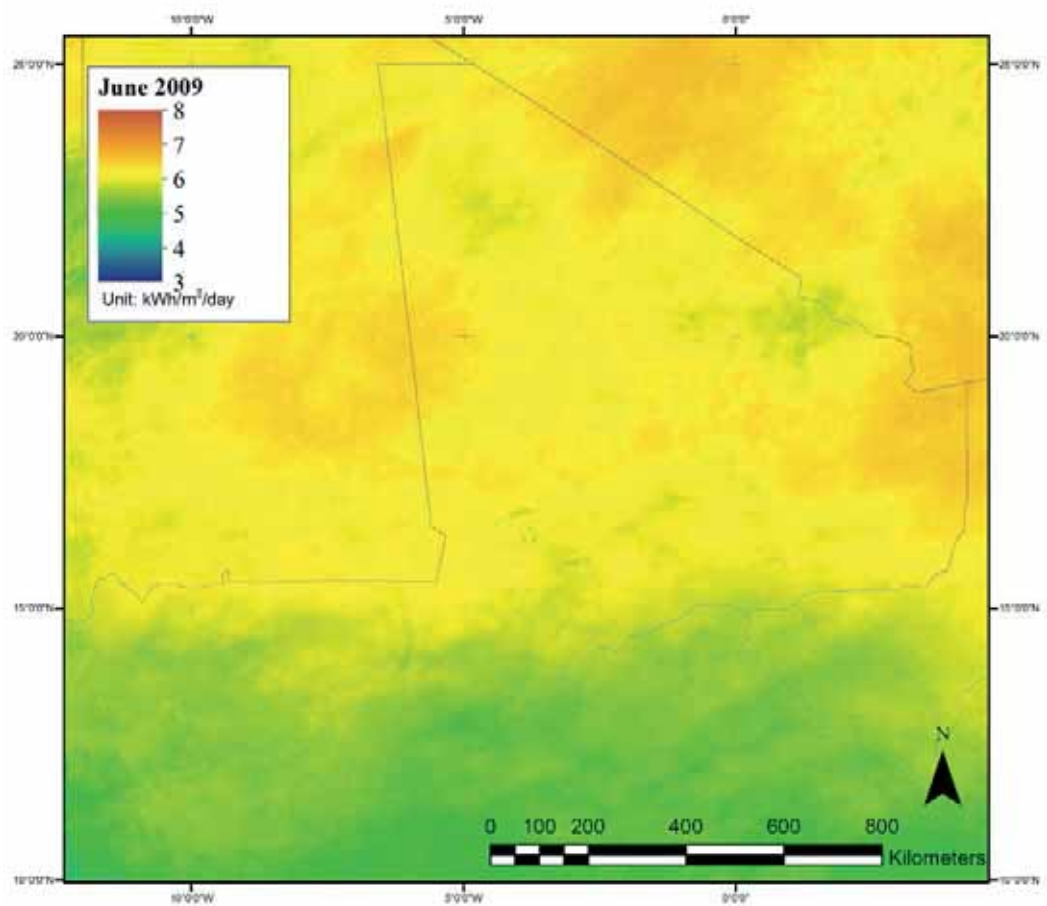
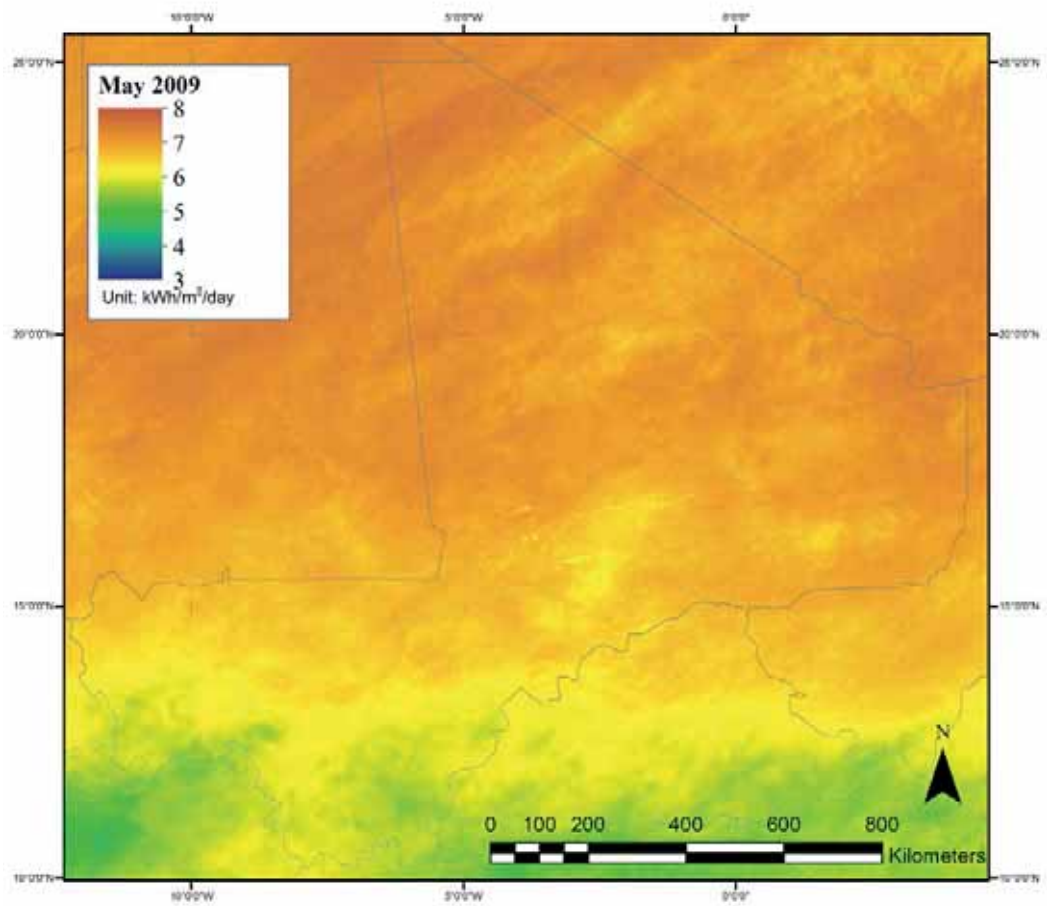


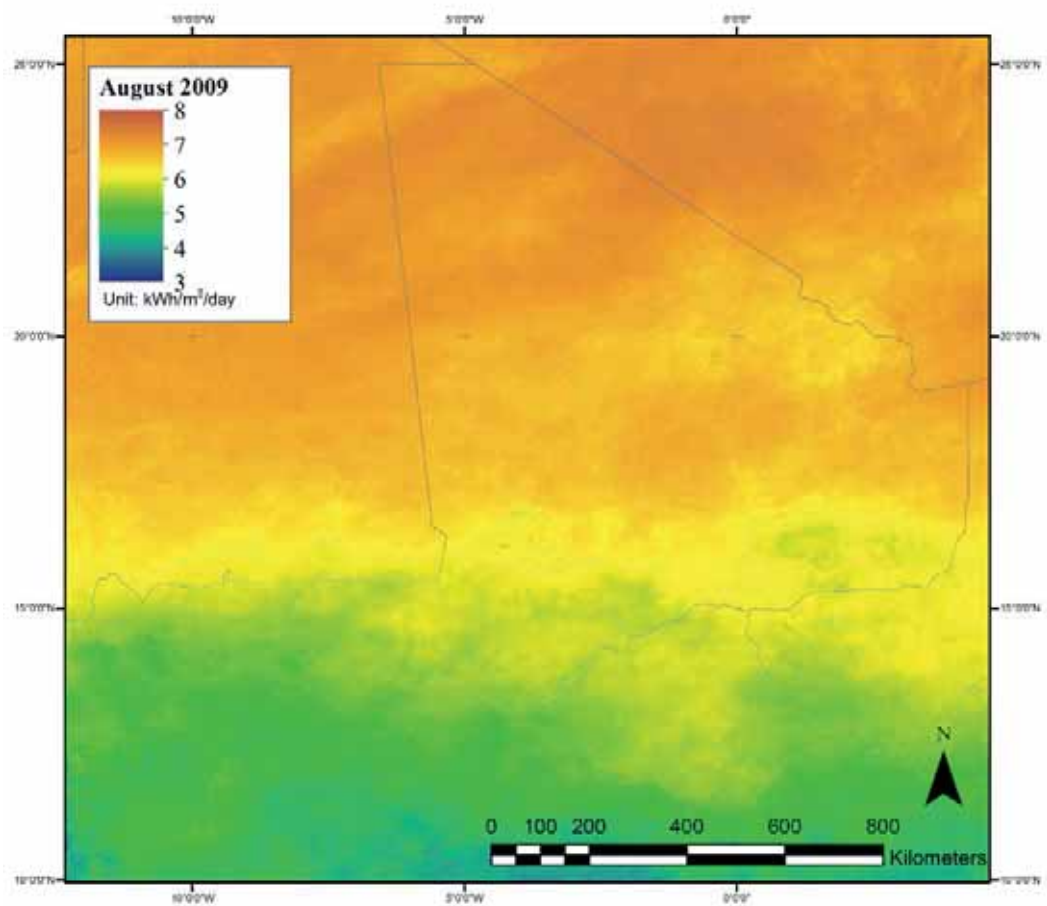
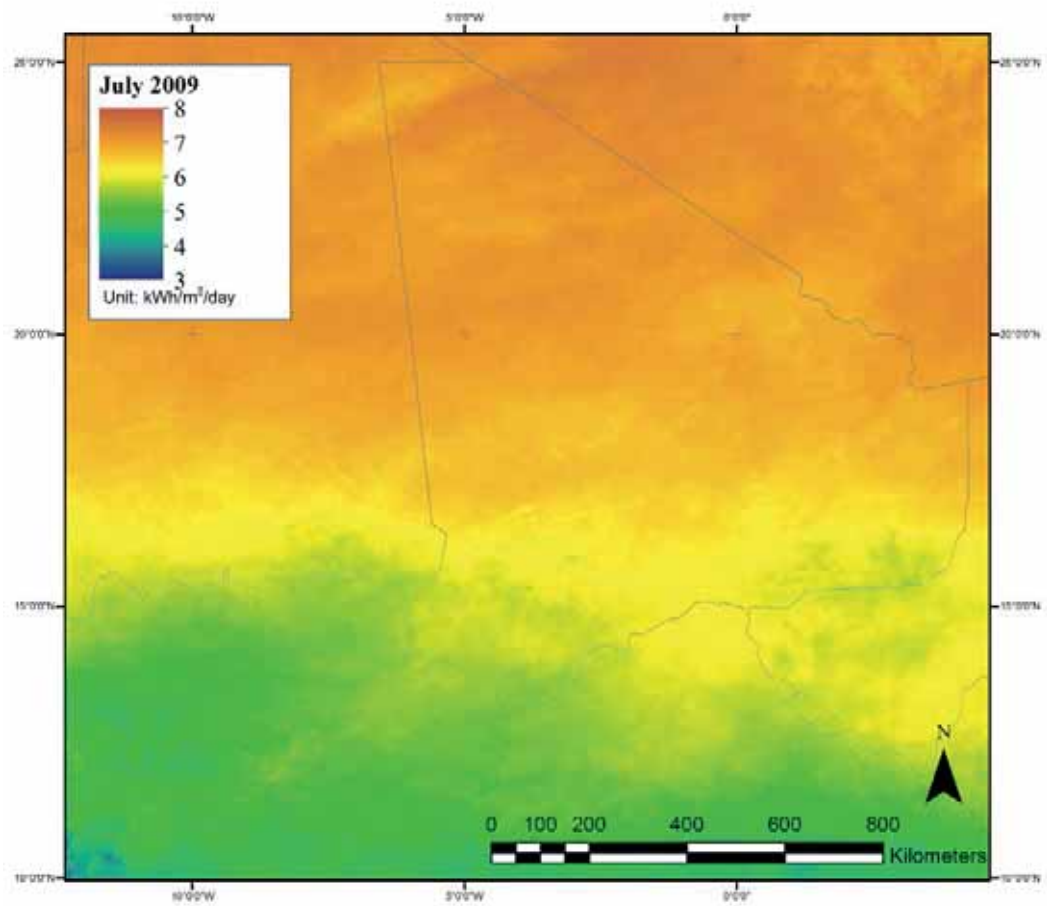




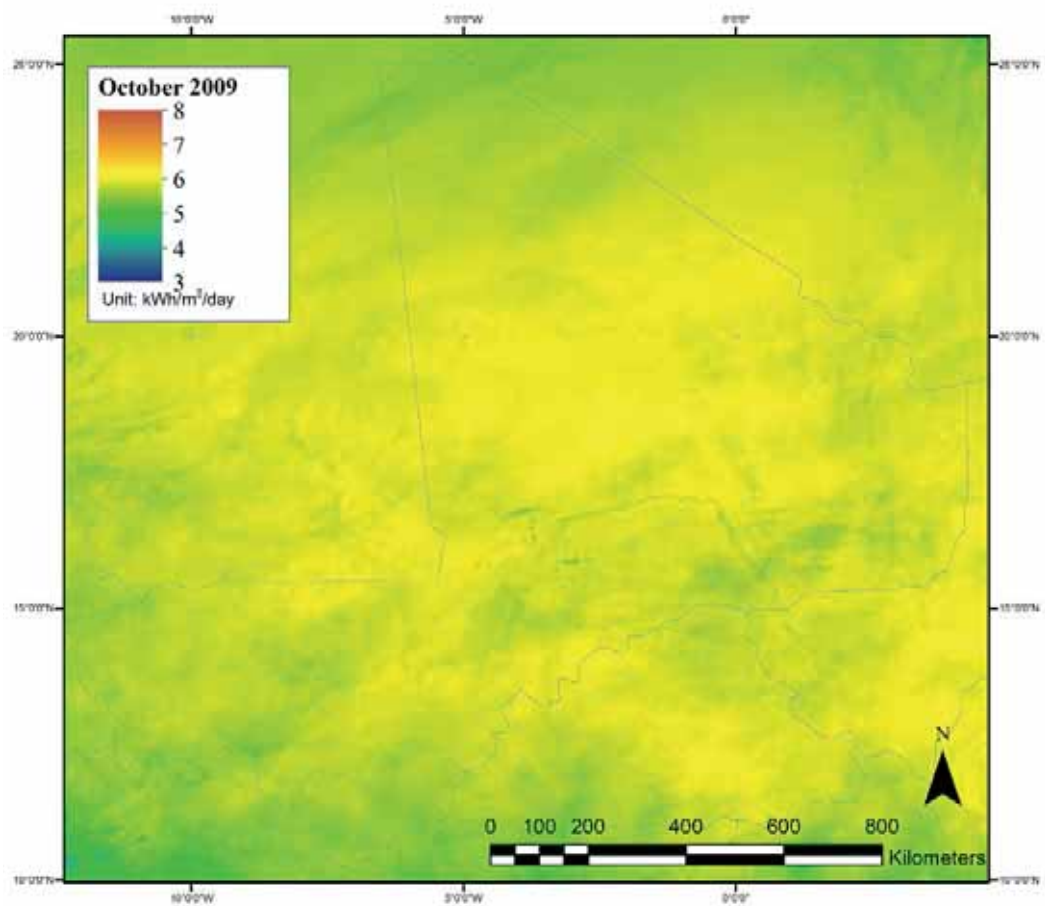
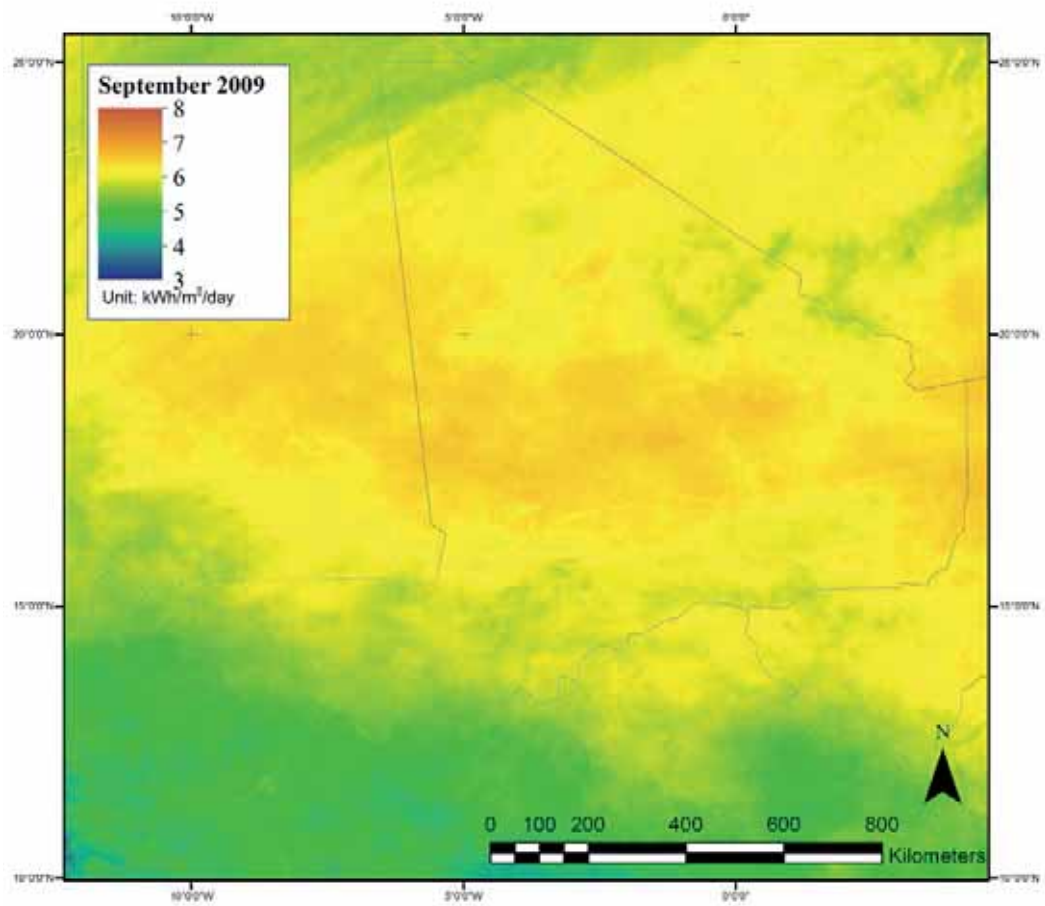


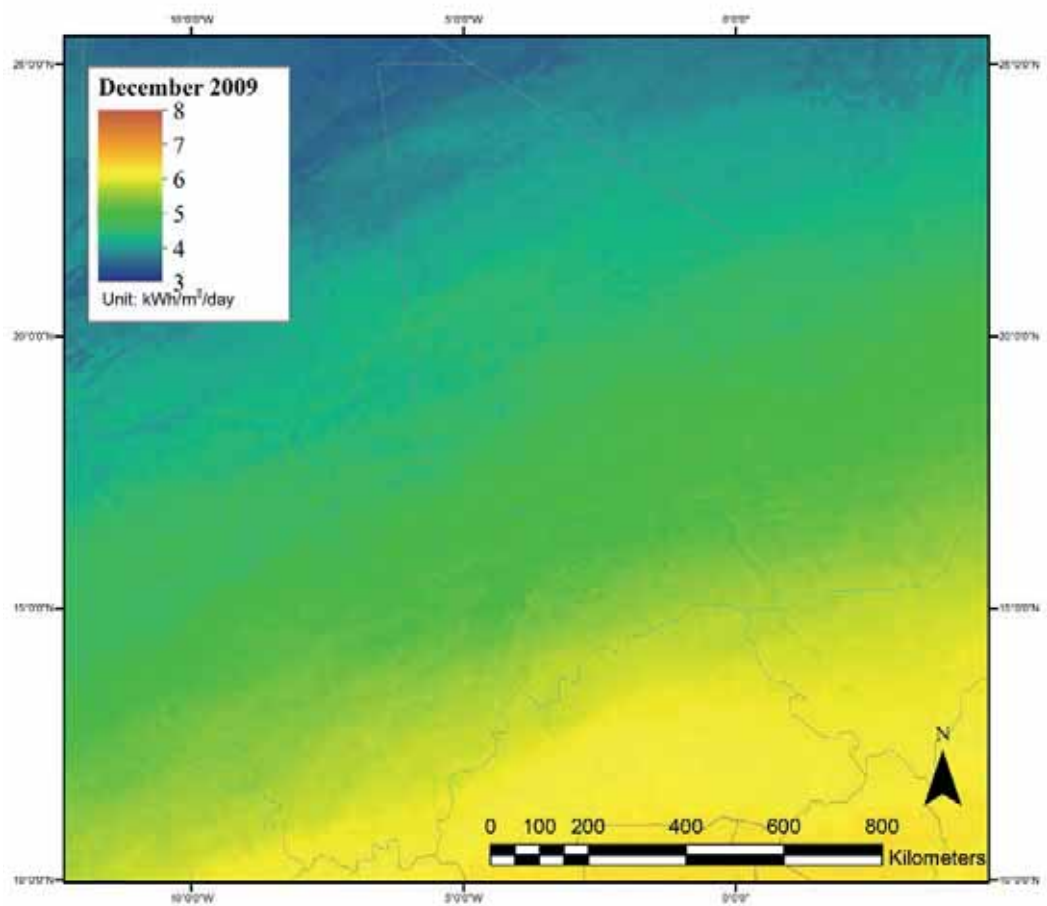
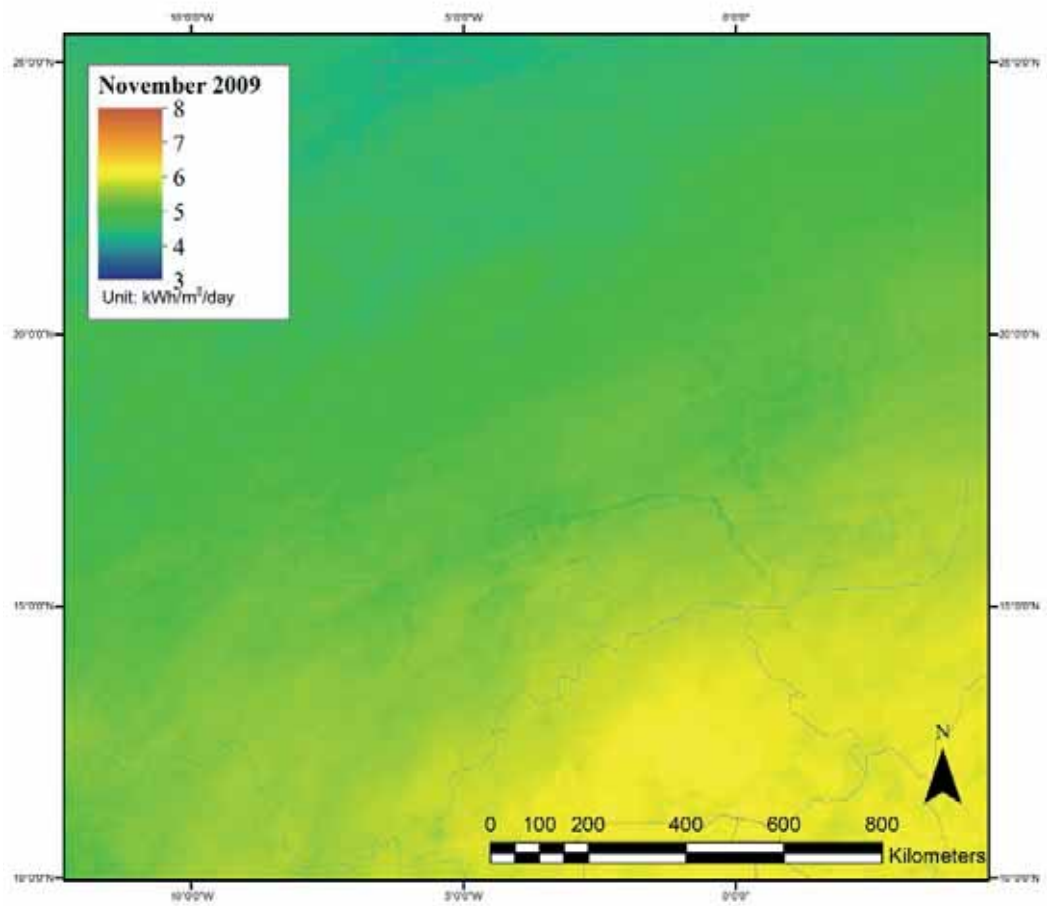


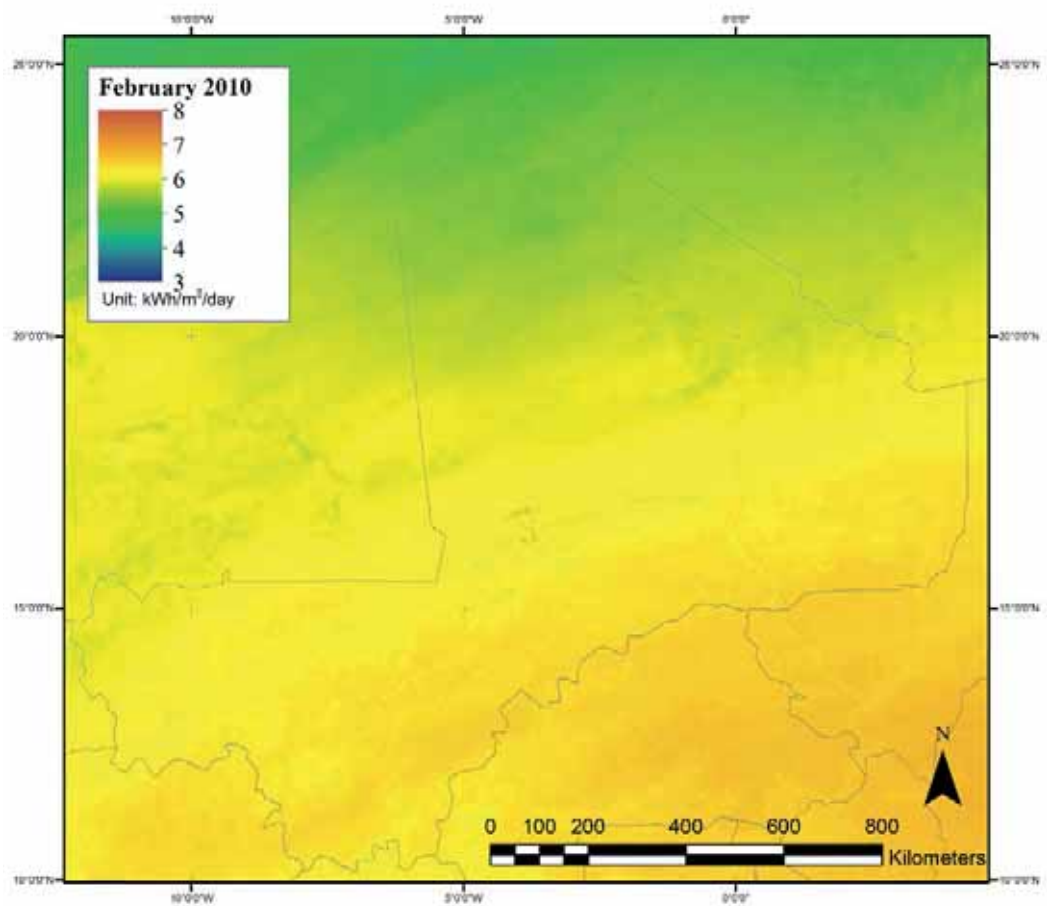
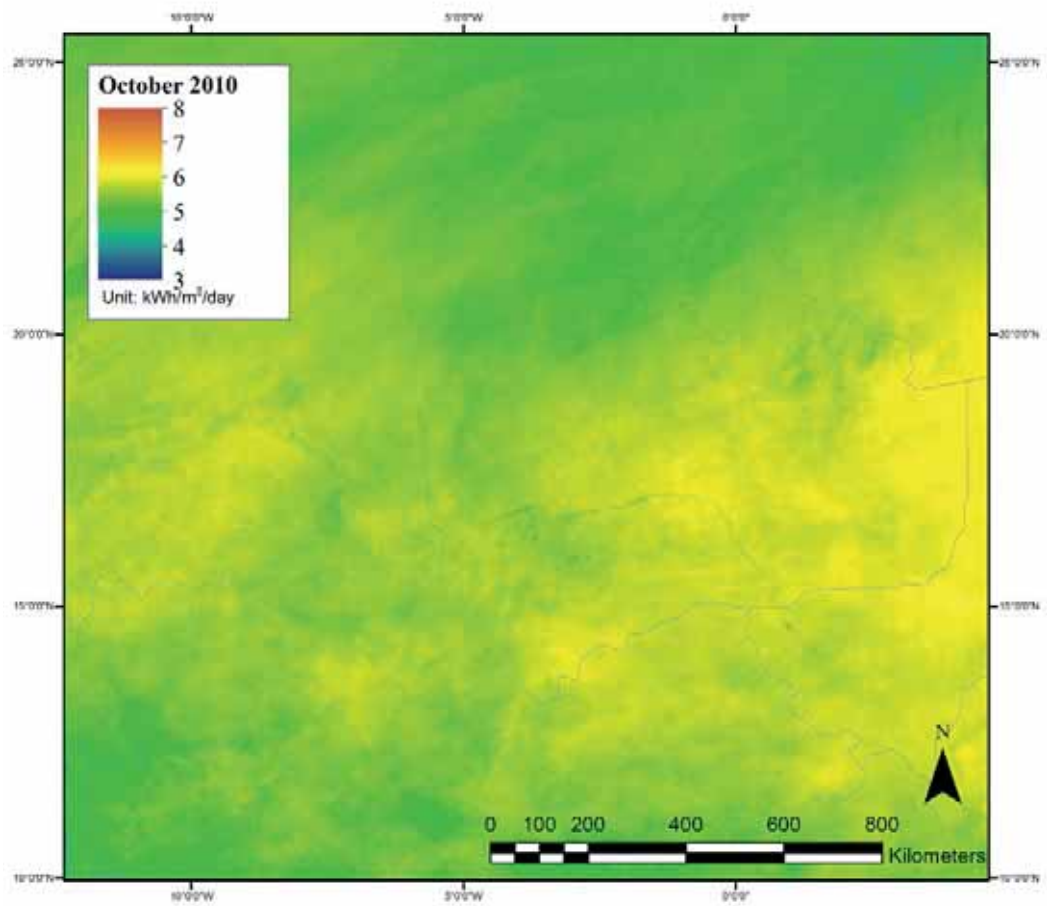




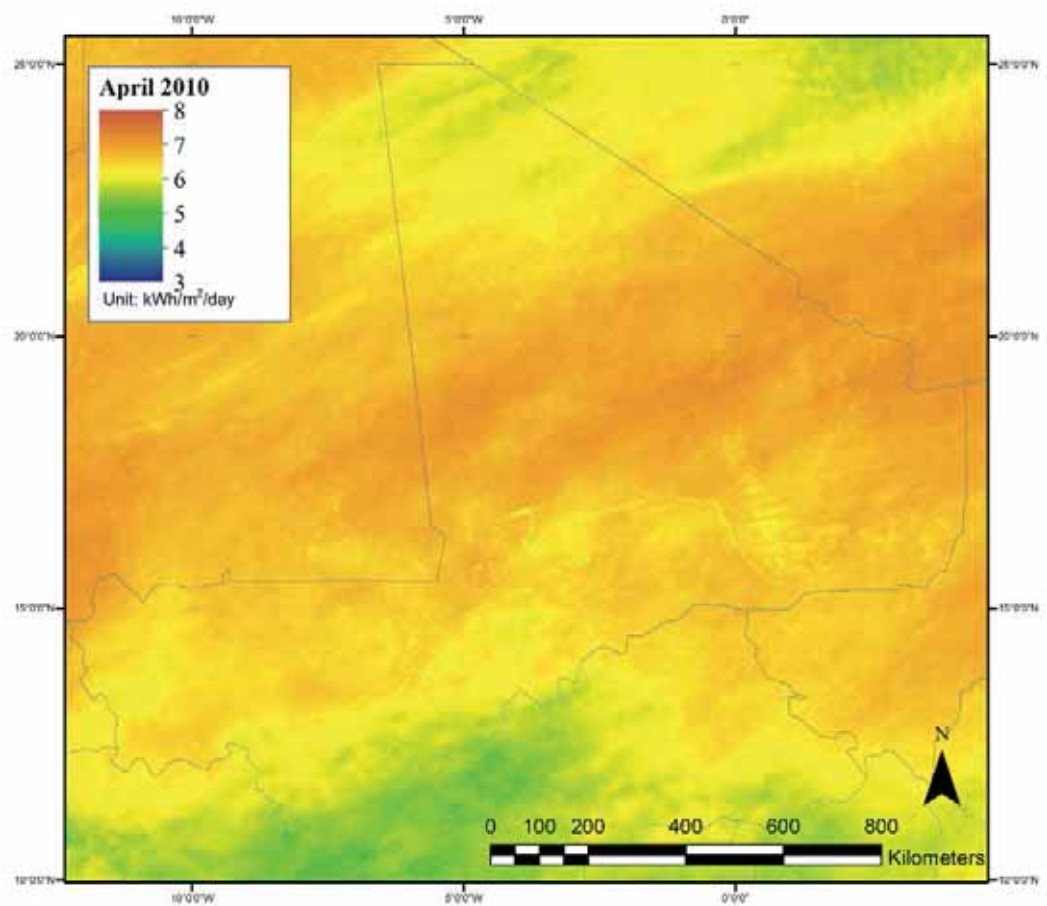
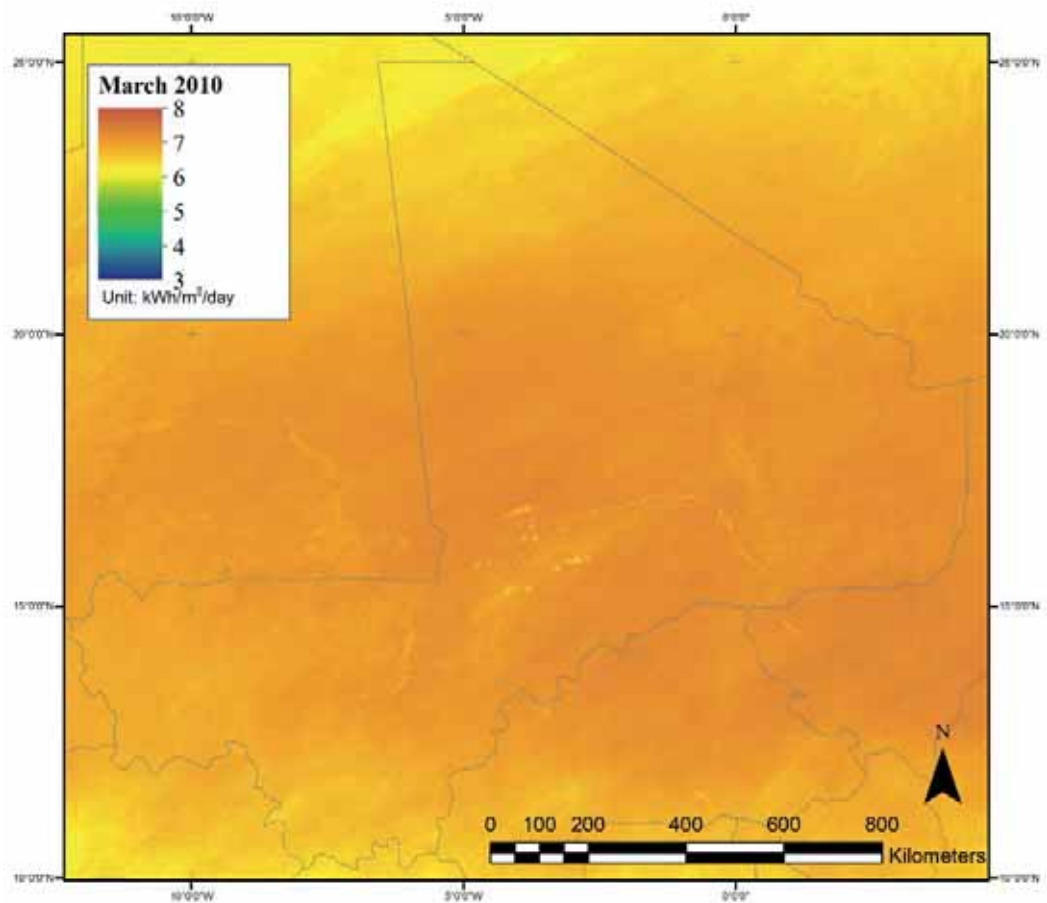


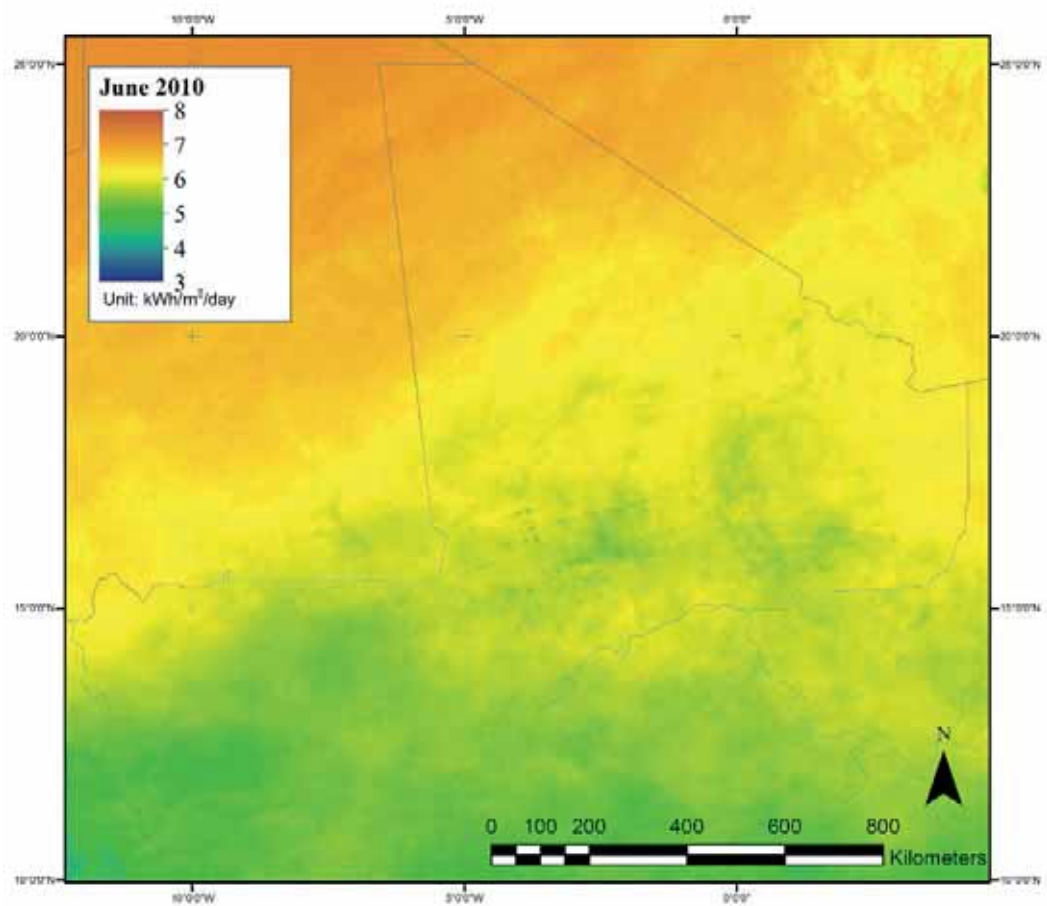
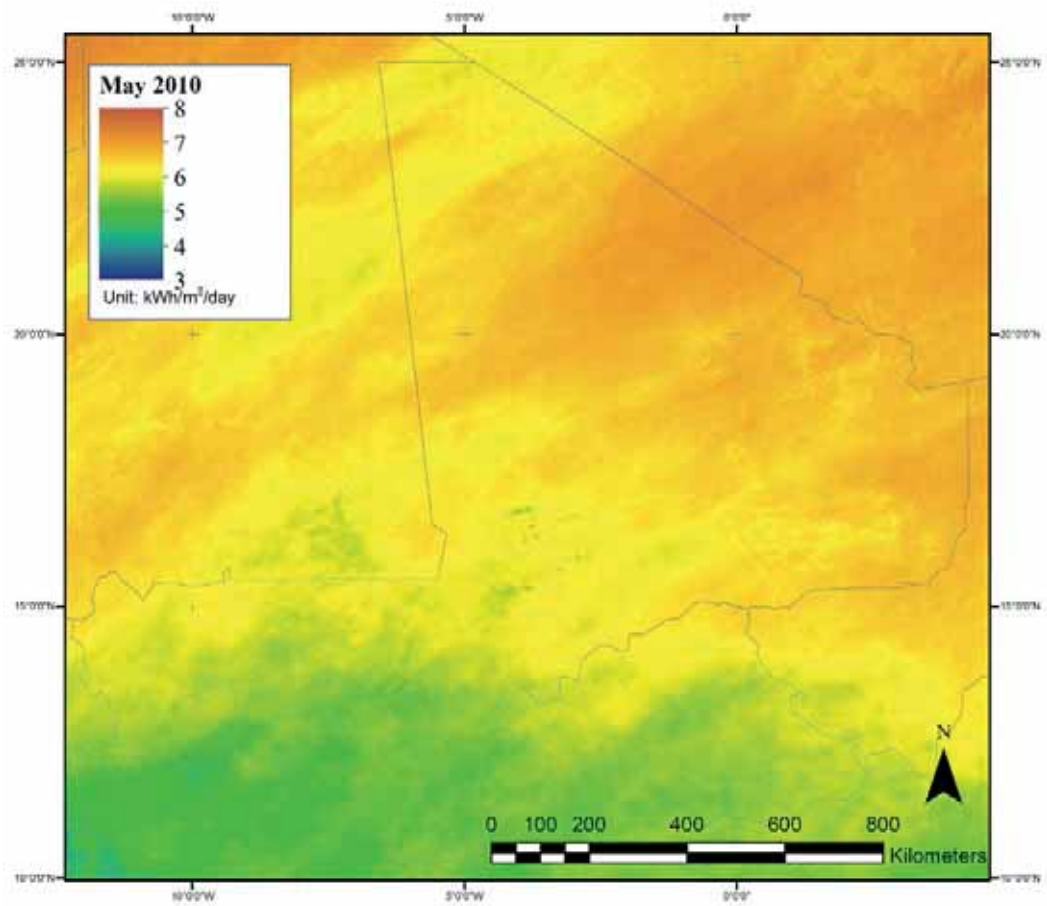


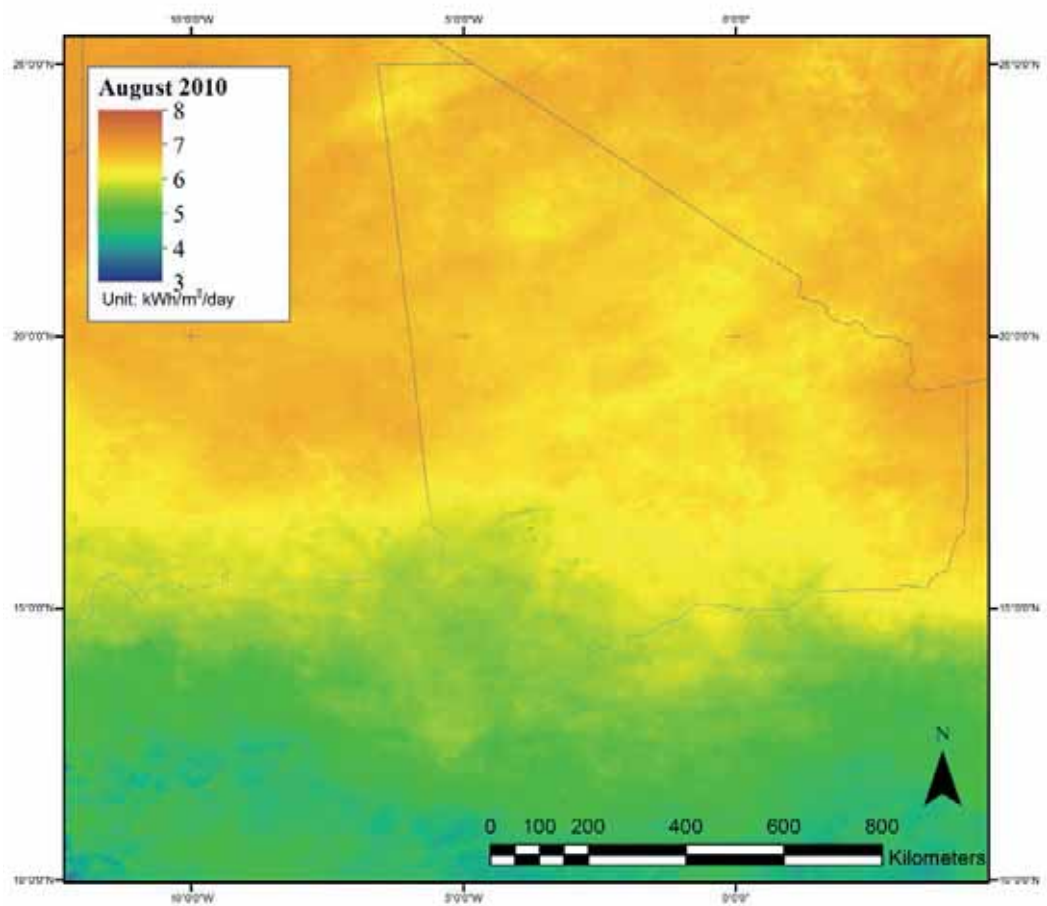
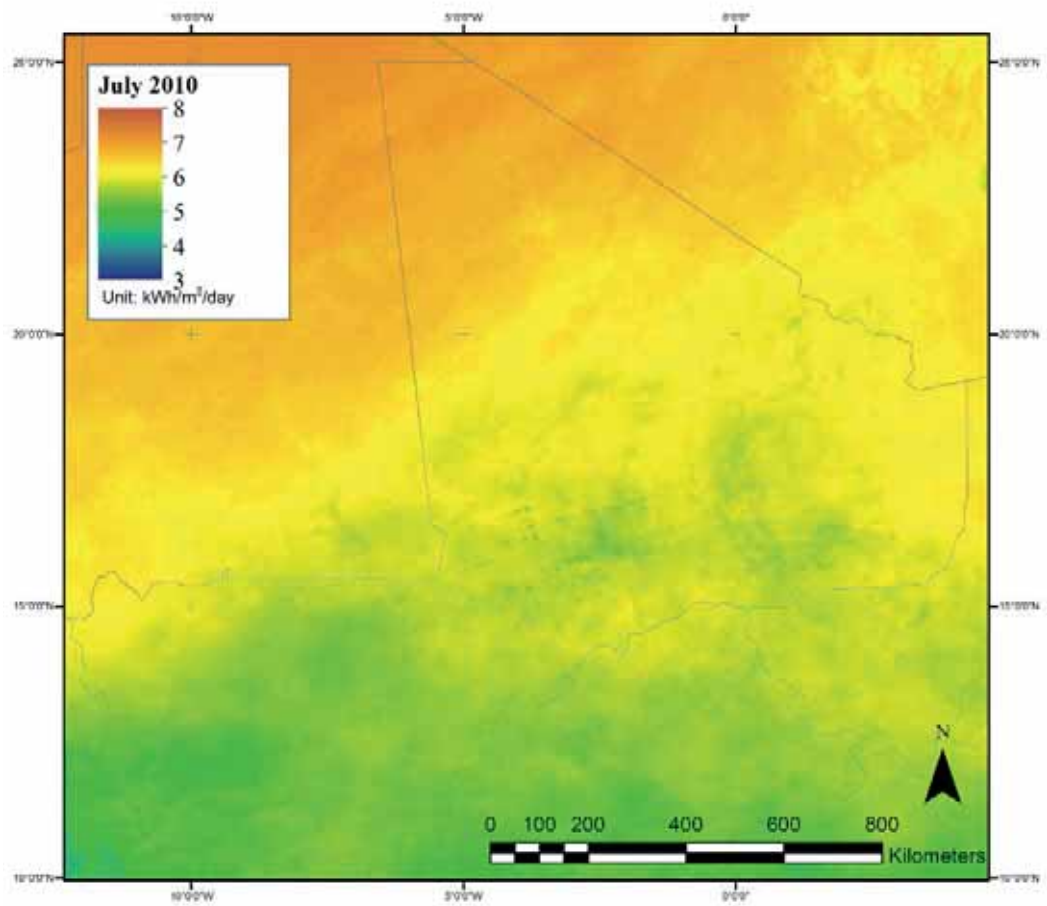


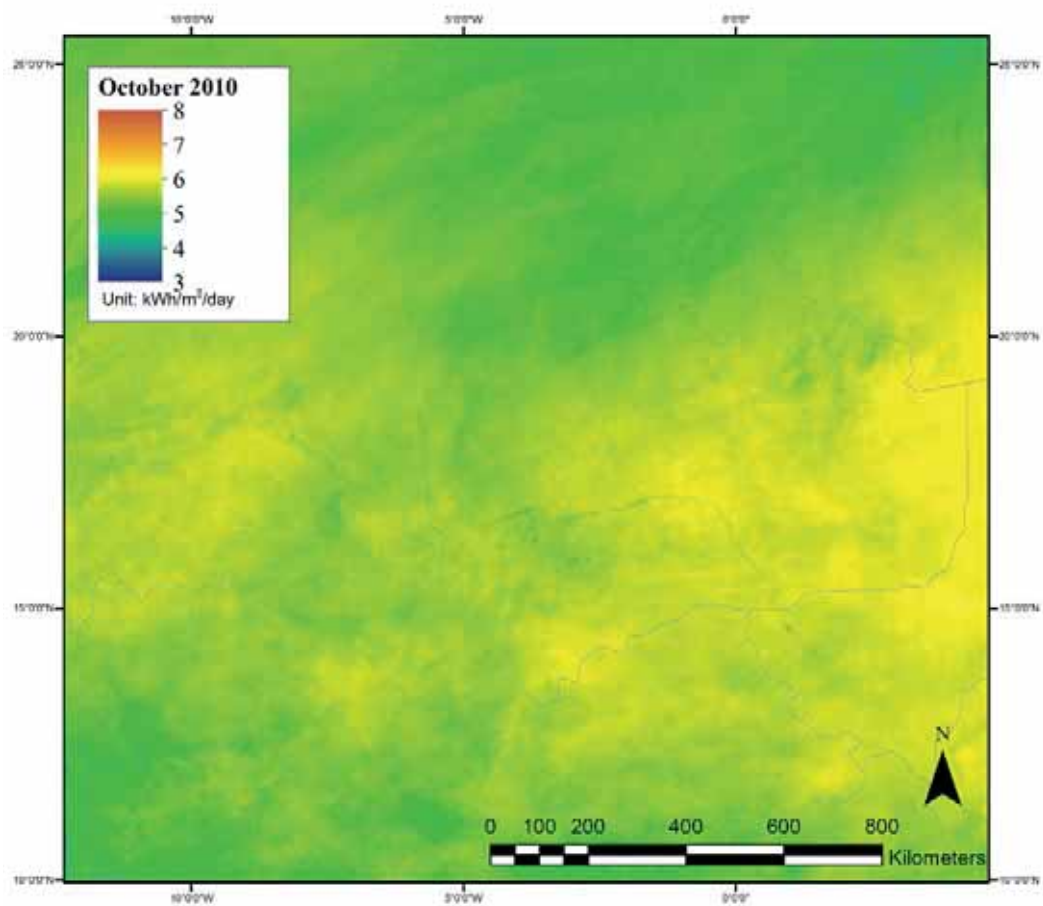
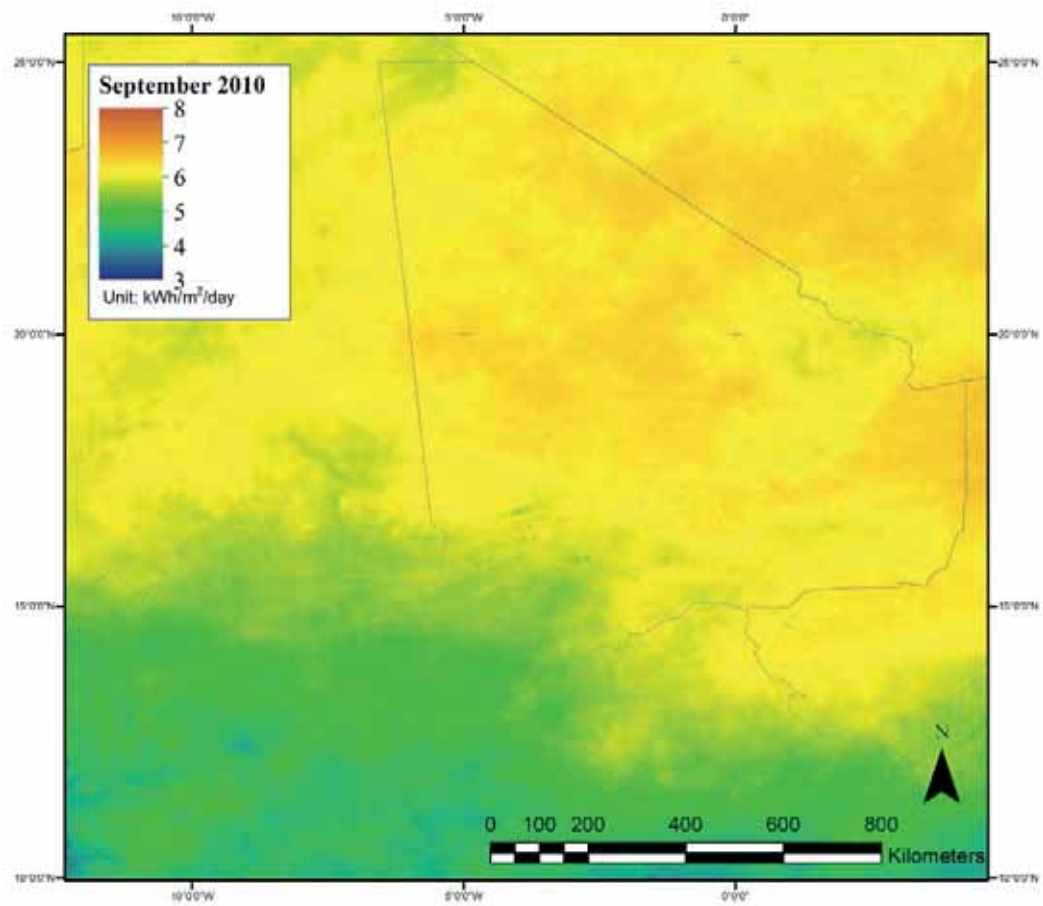




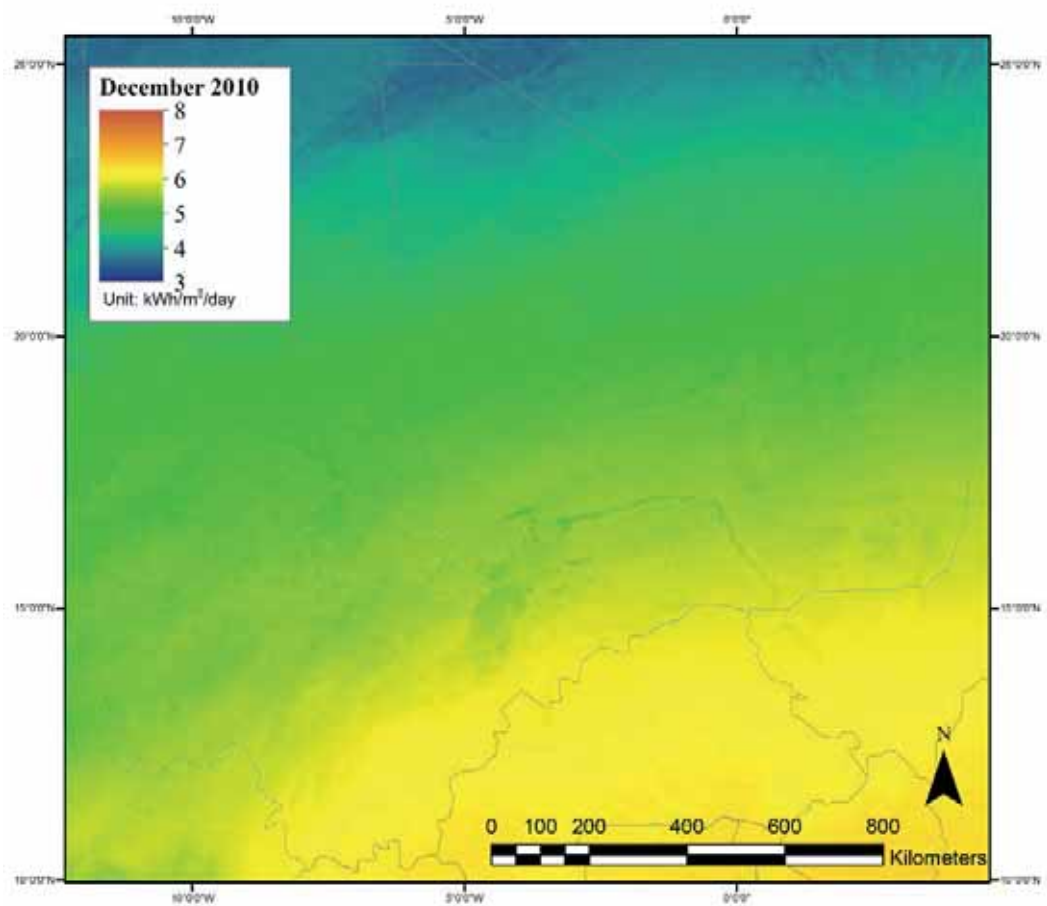
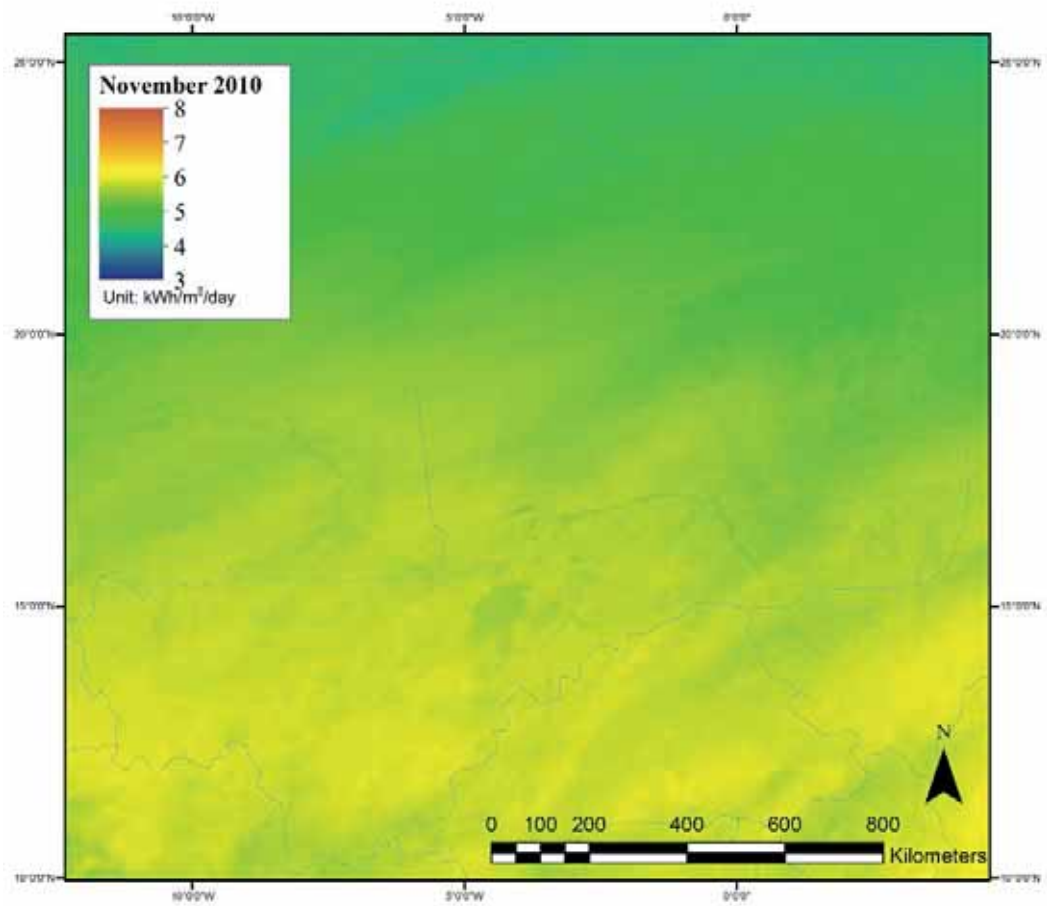


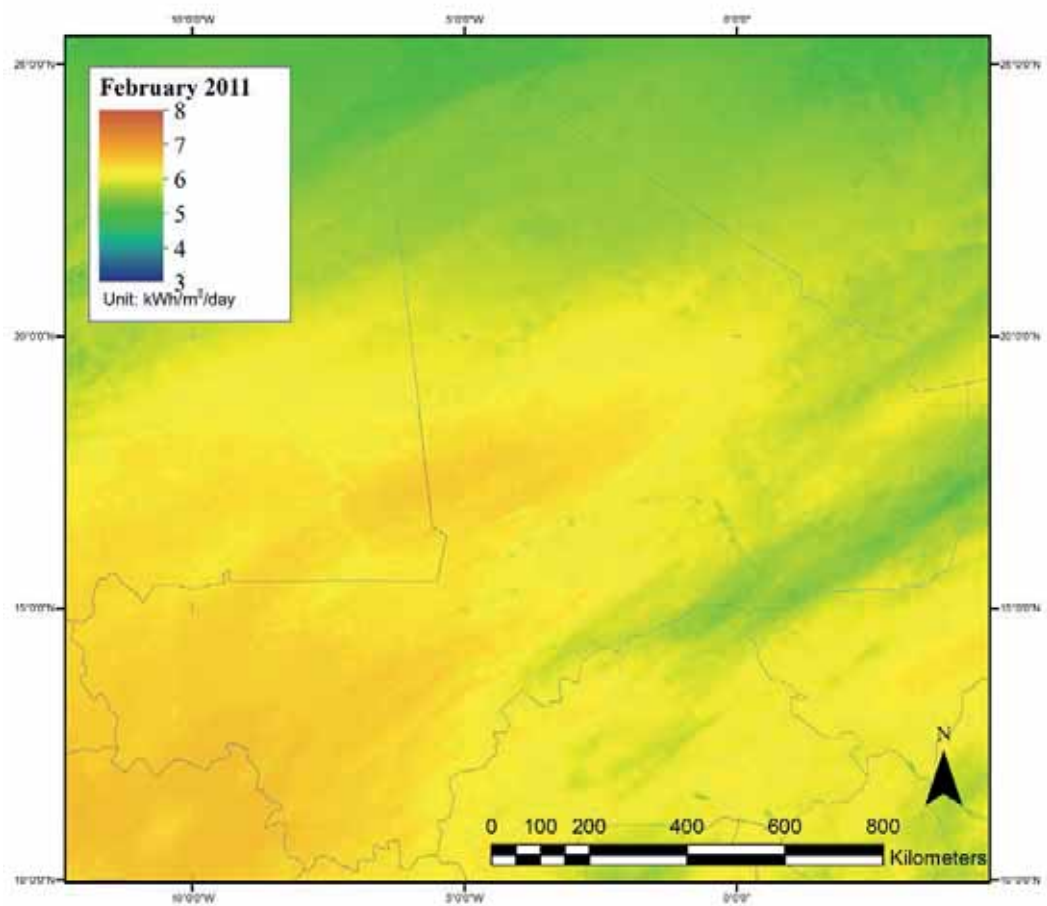
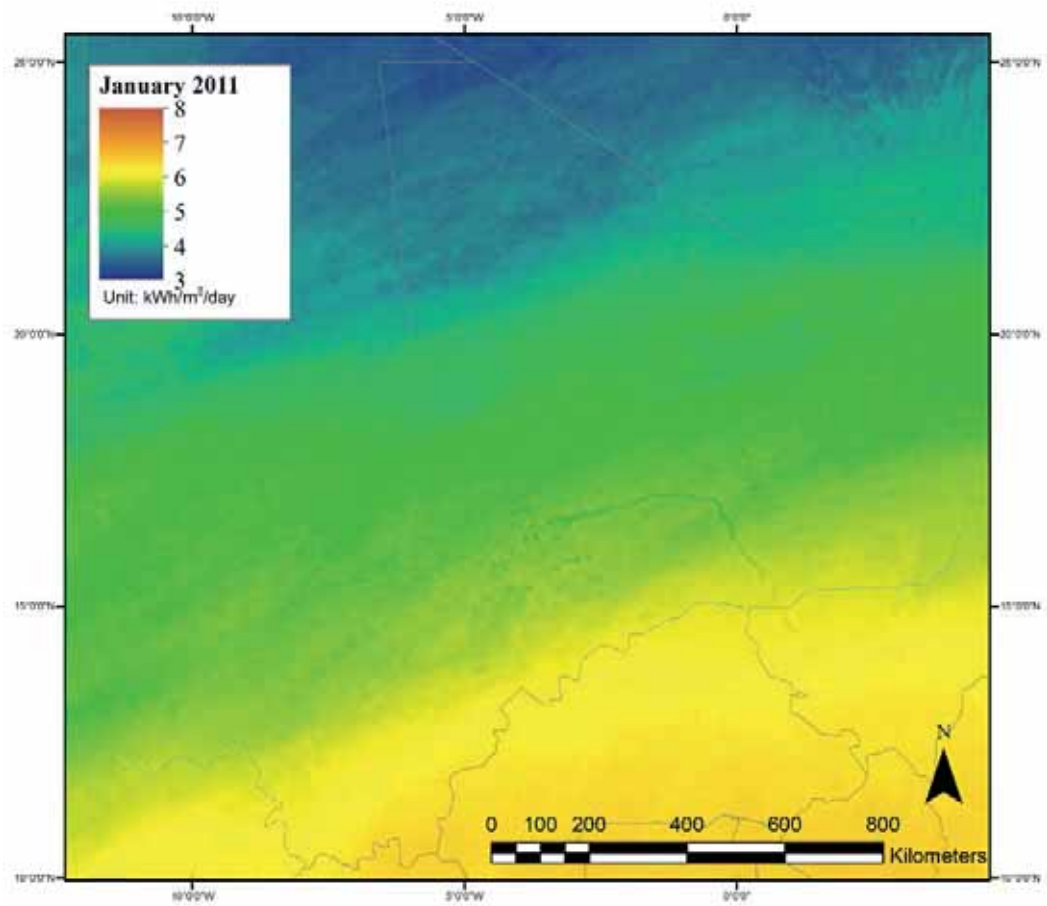


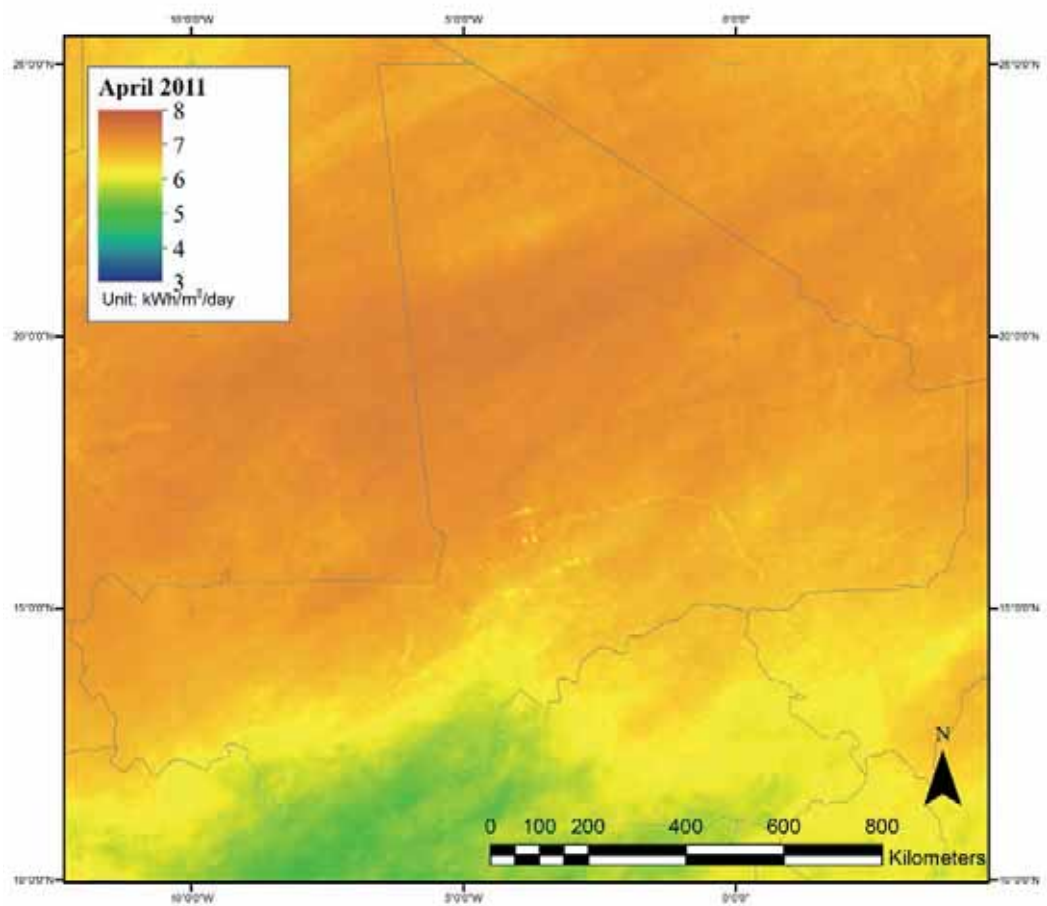
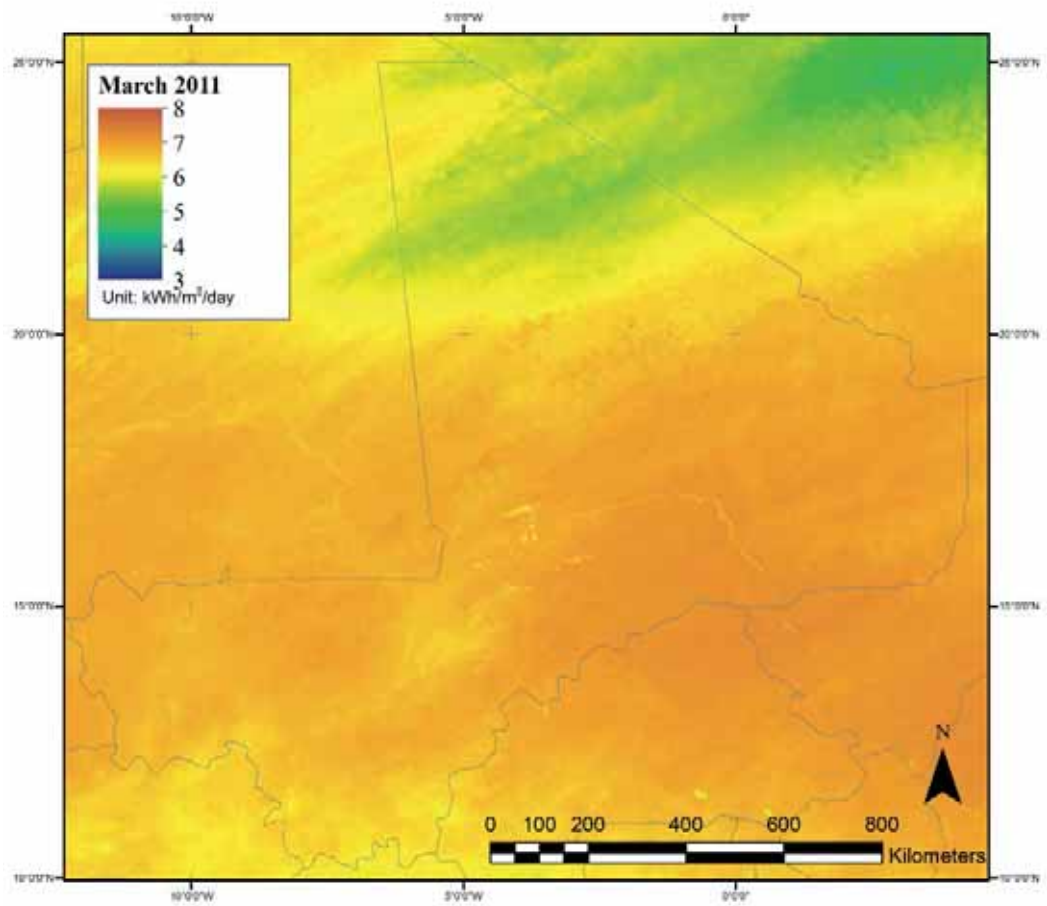




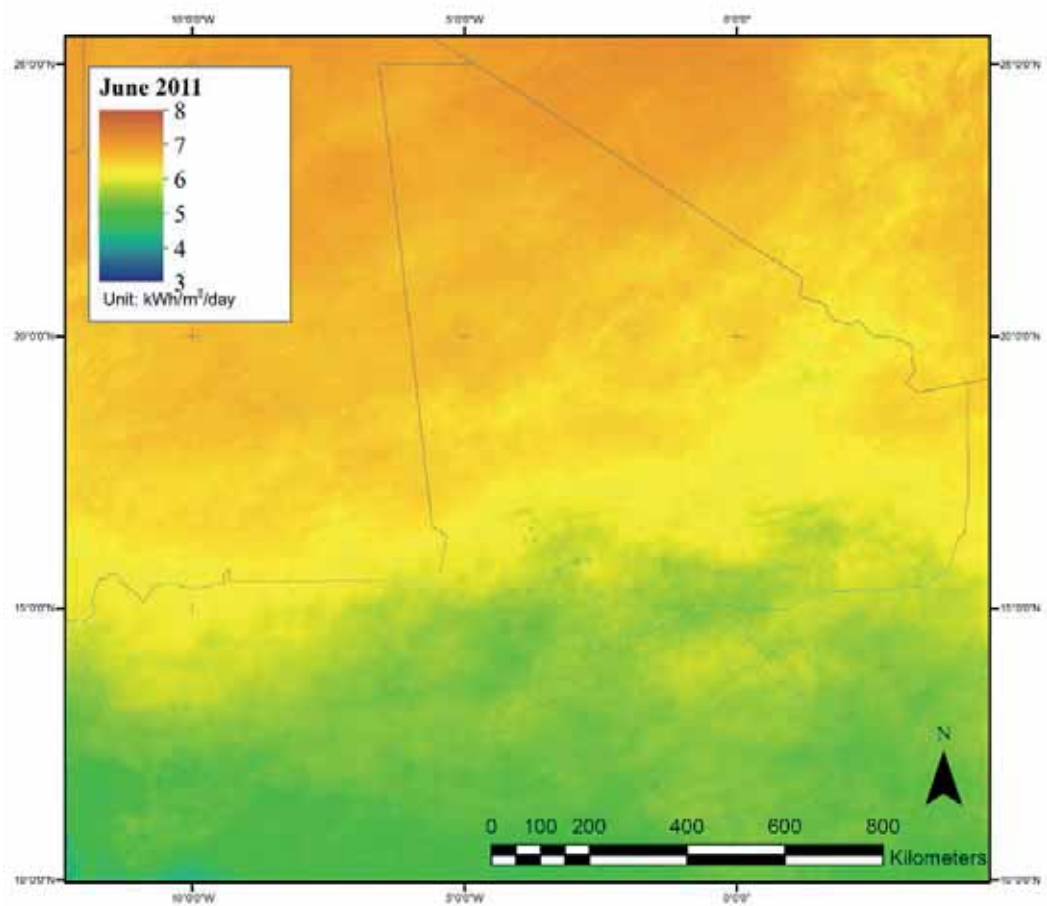
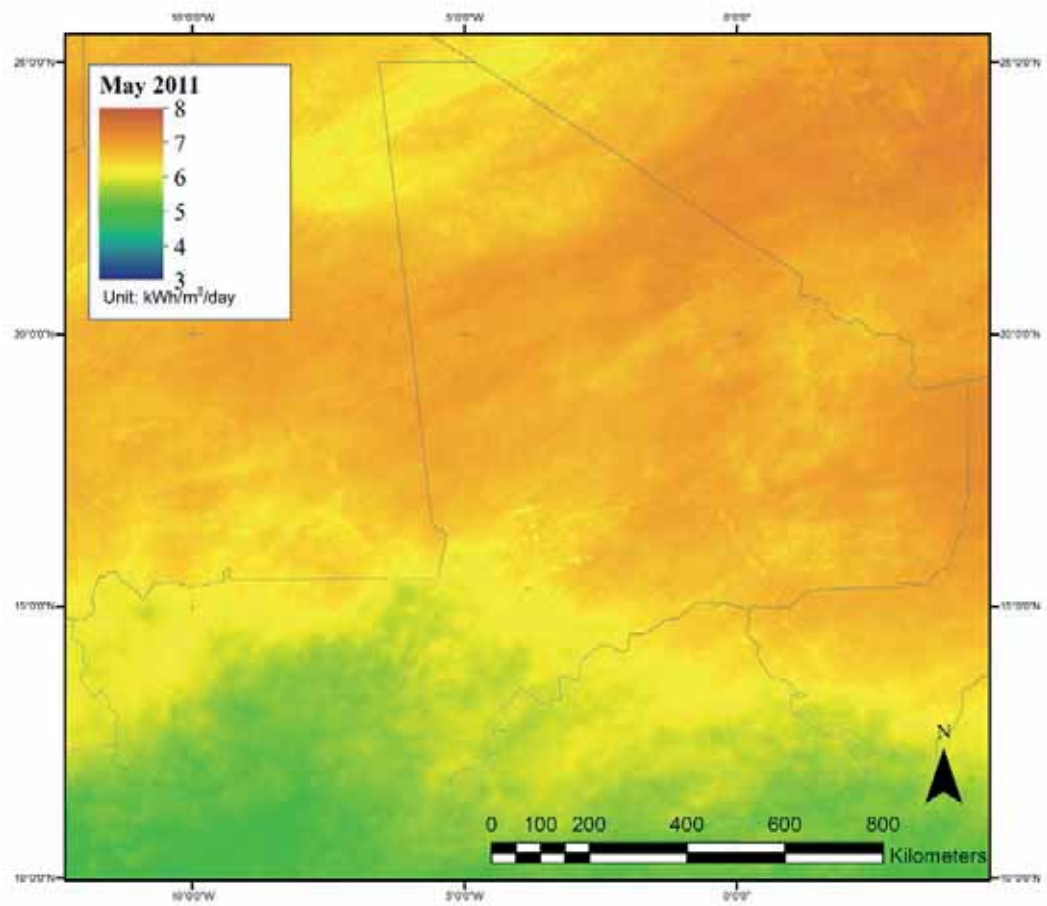




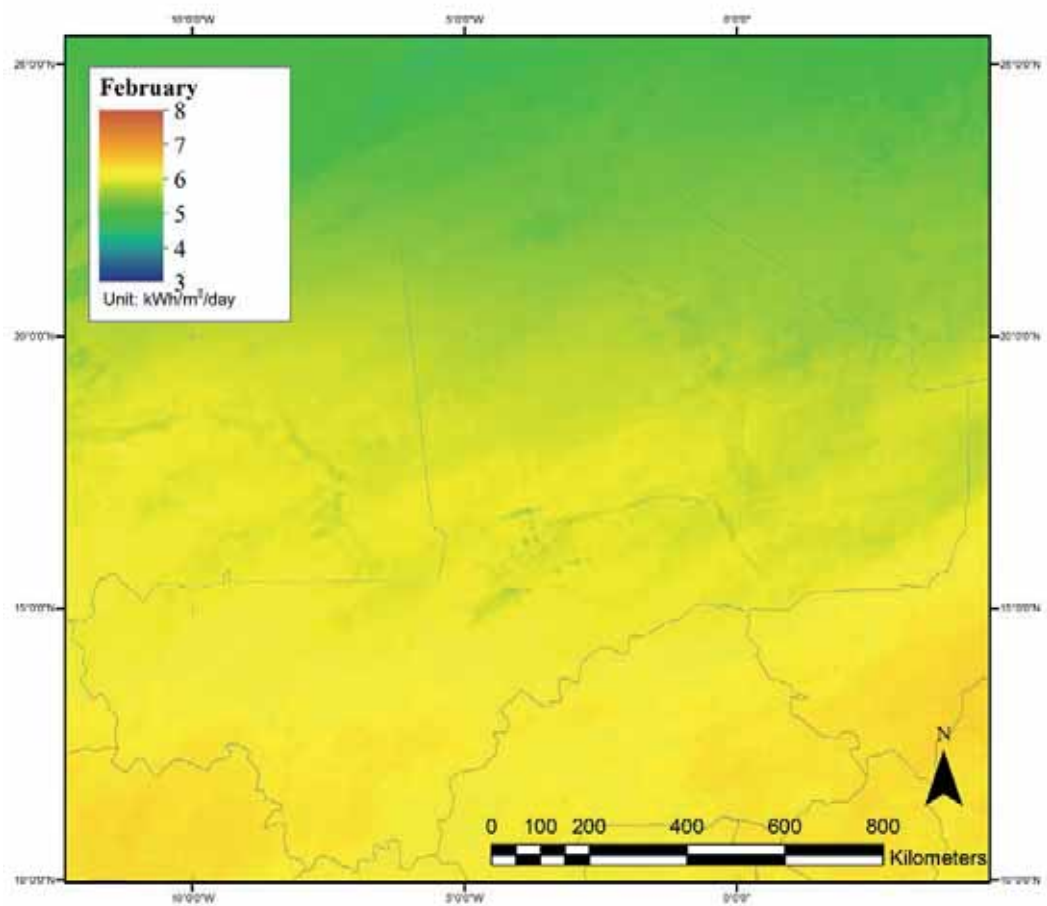
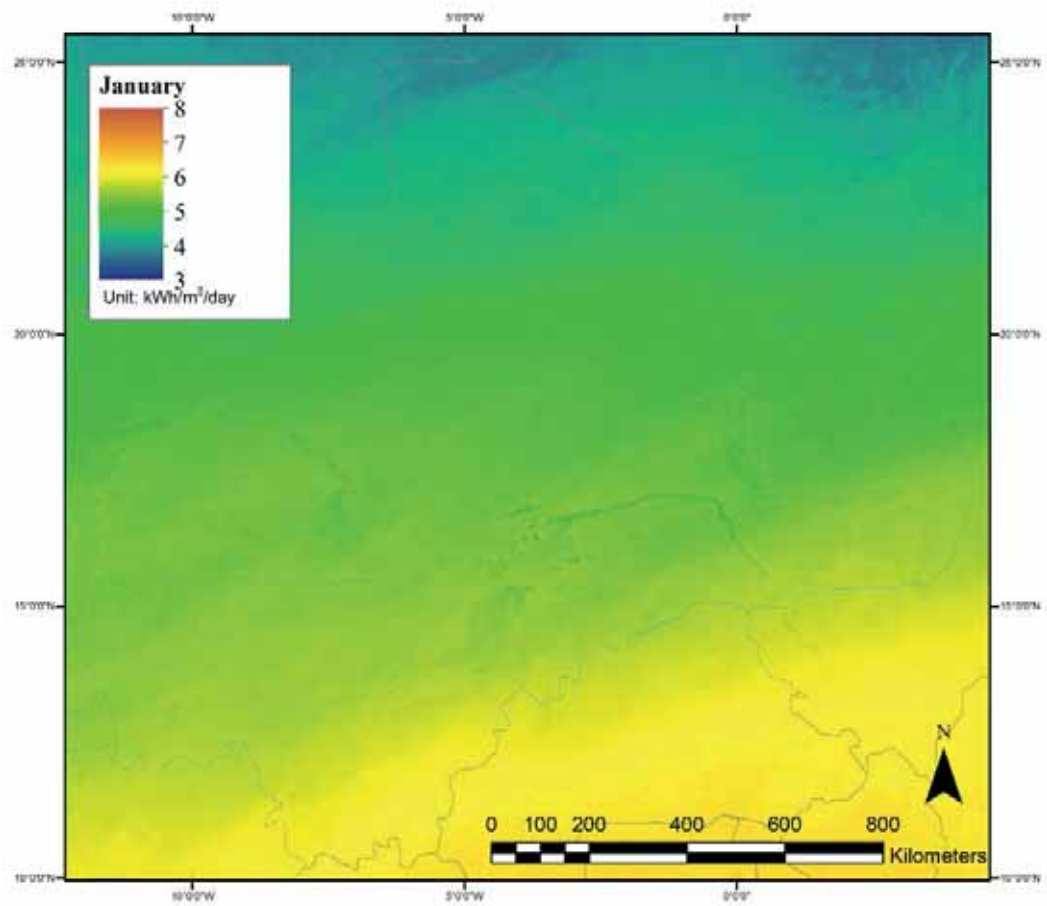


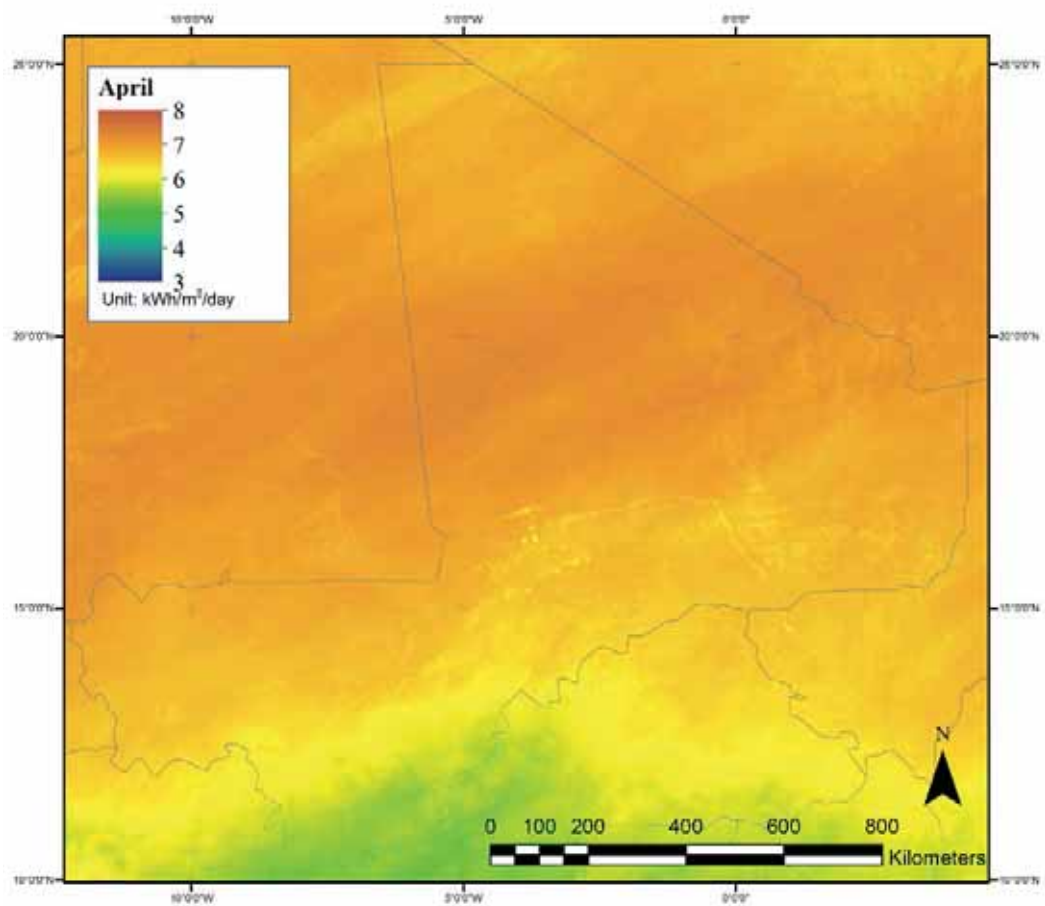
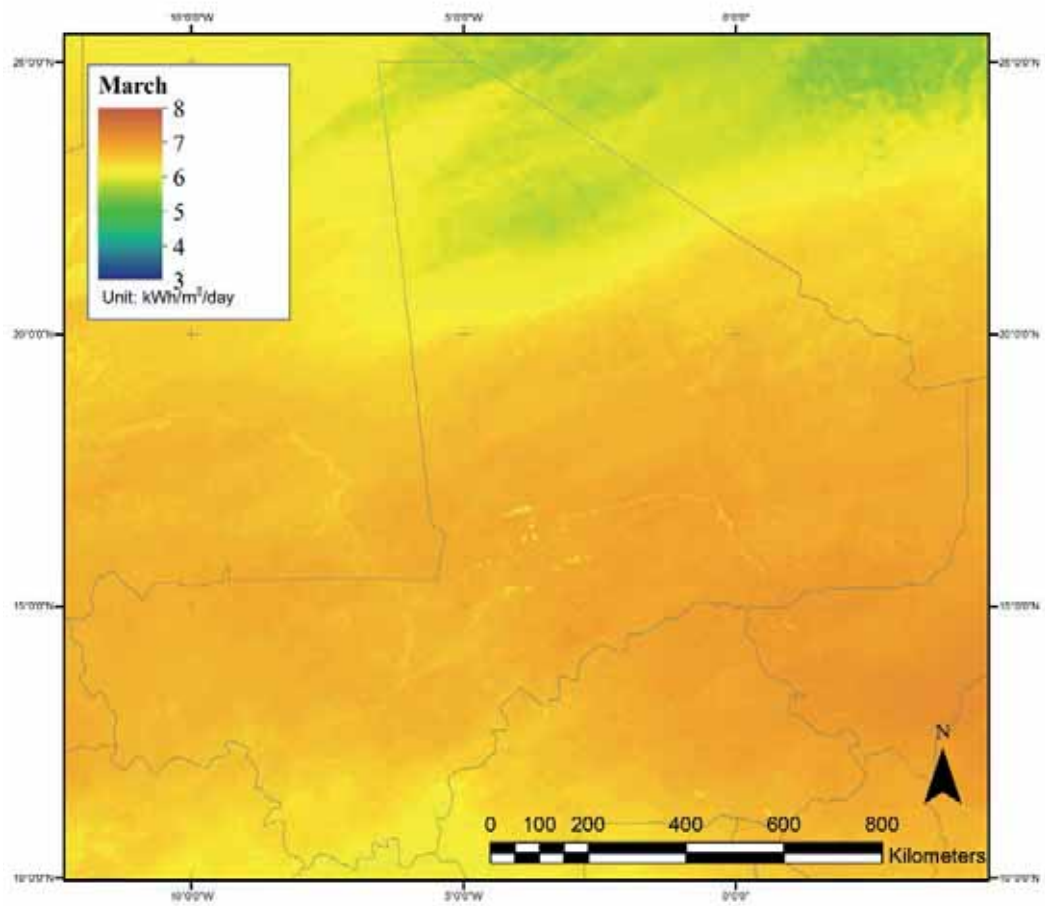


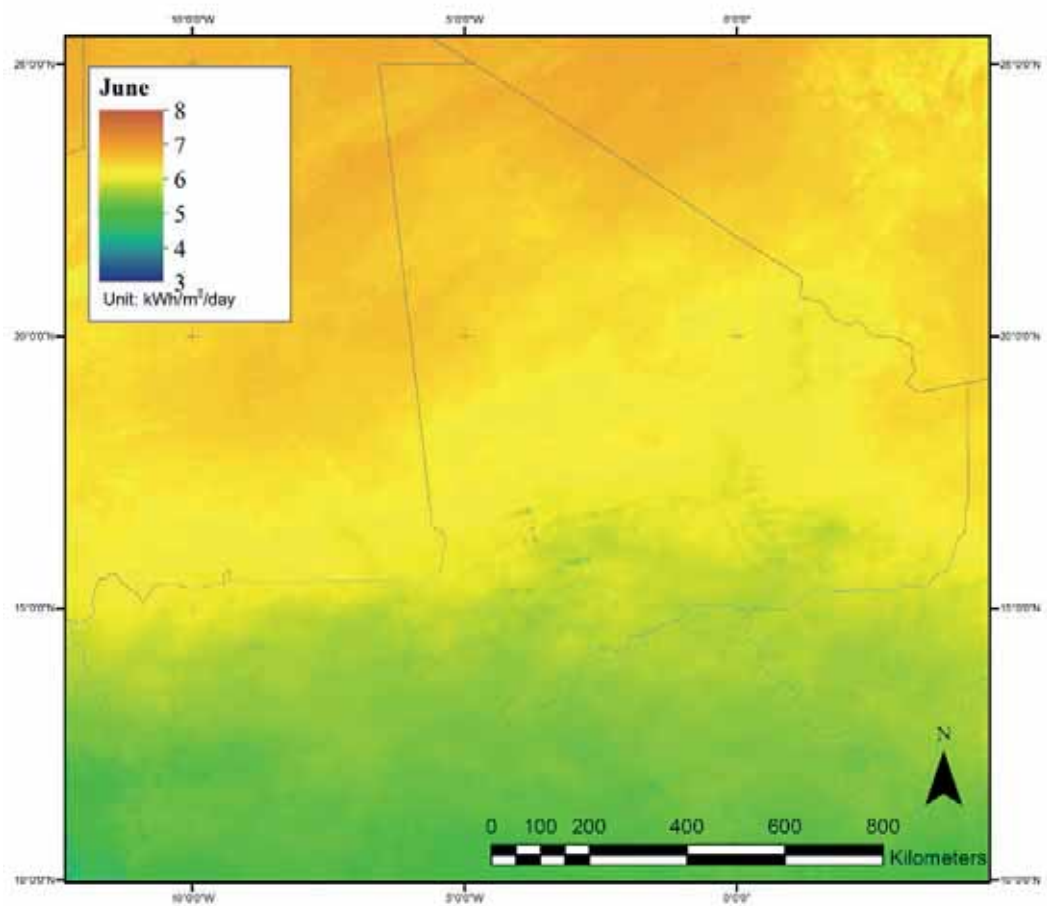
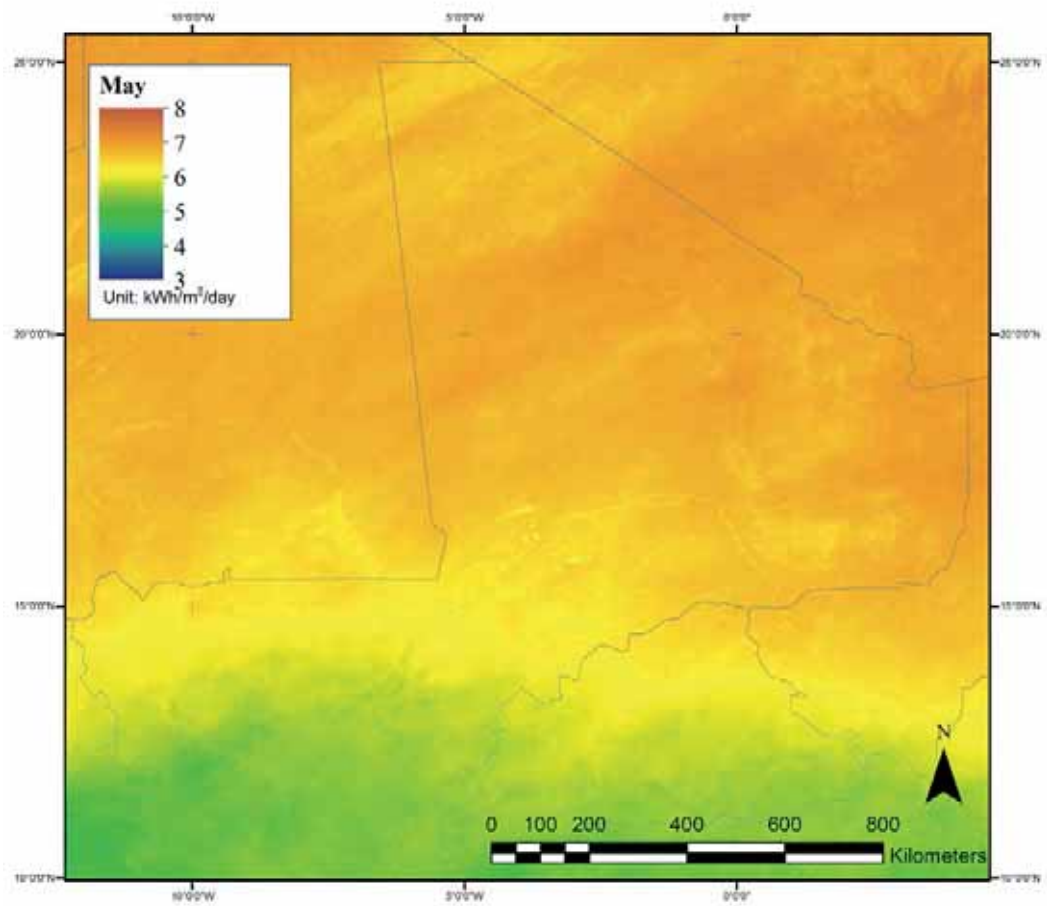


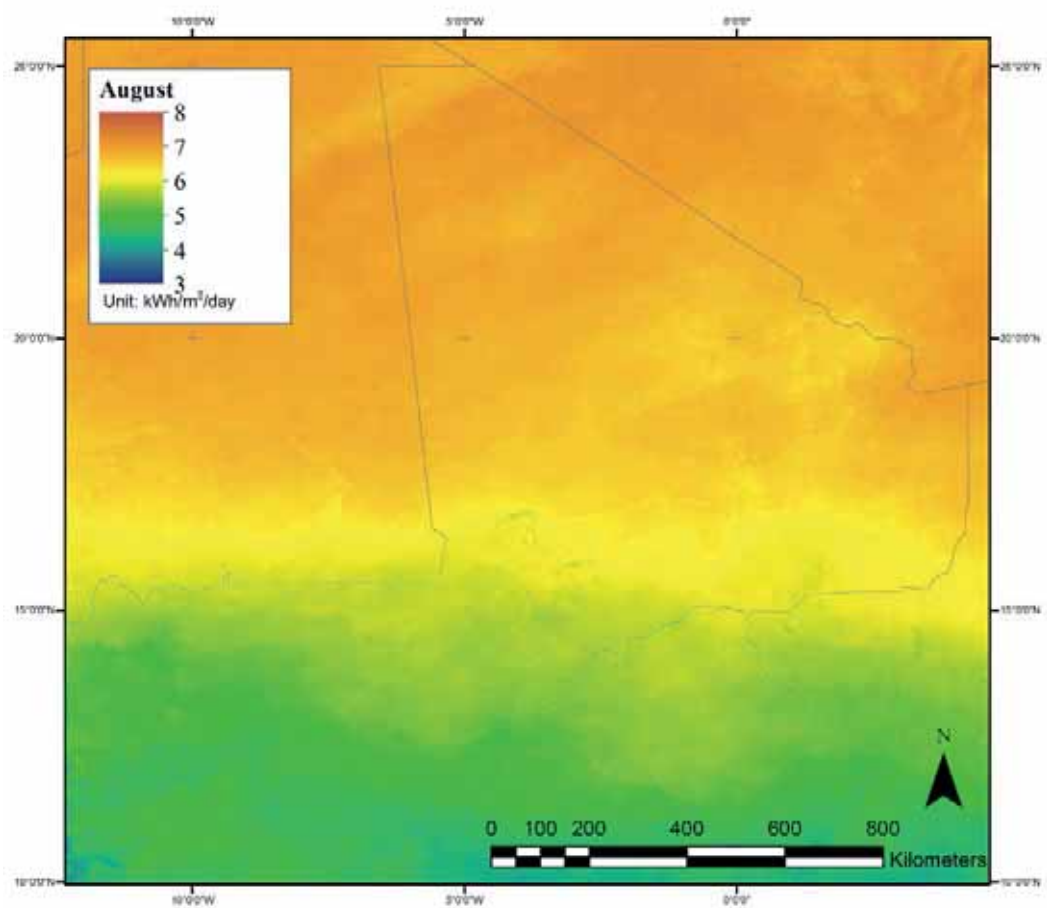
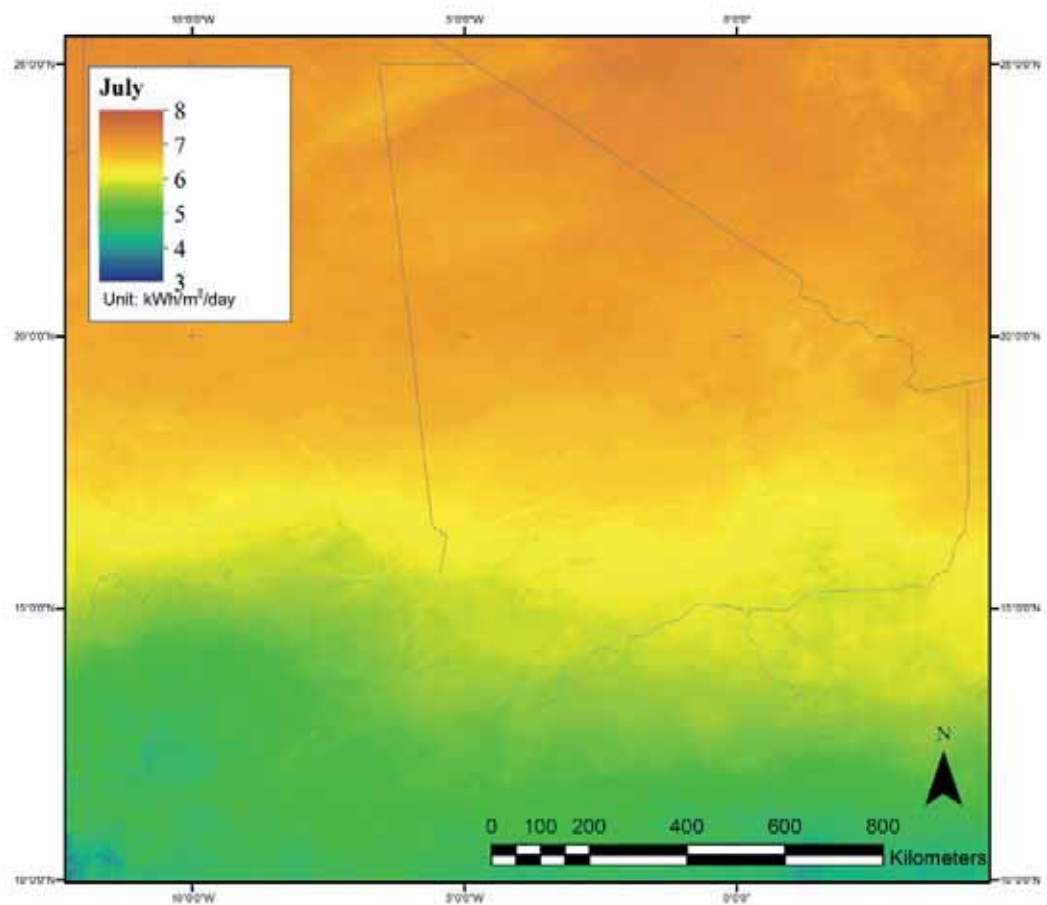


**4. Moyen quotidien mensuel en kWh/m<sup>2</sup>/jour pour les trois années sur lesquelles porte cette étude**

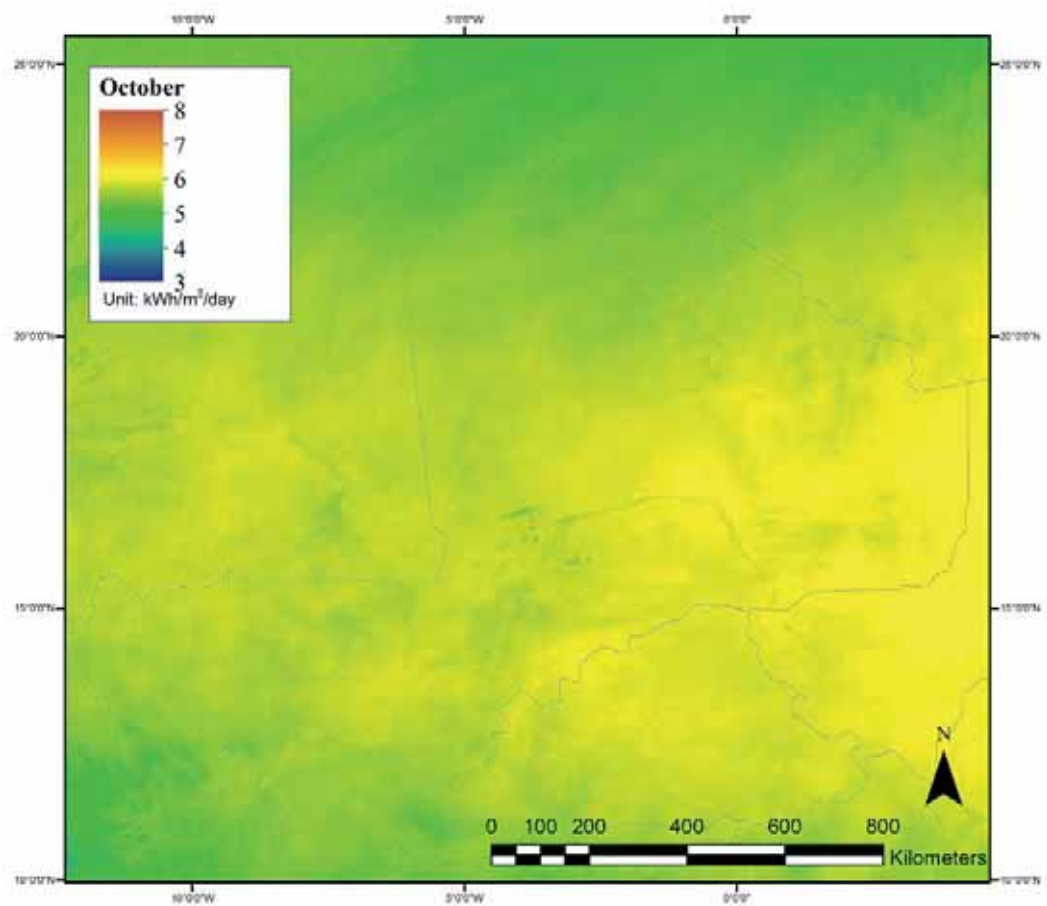
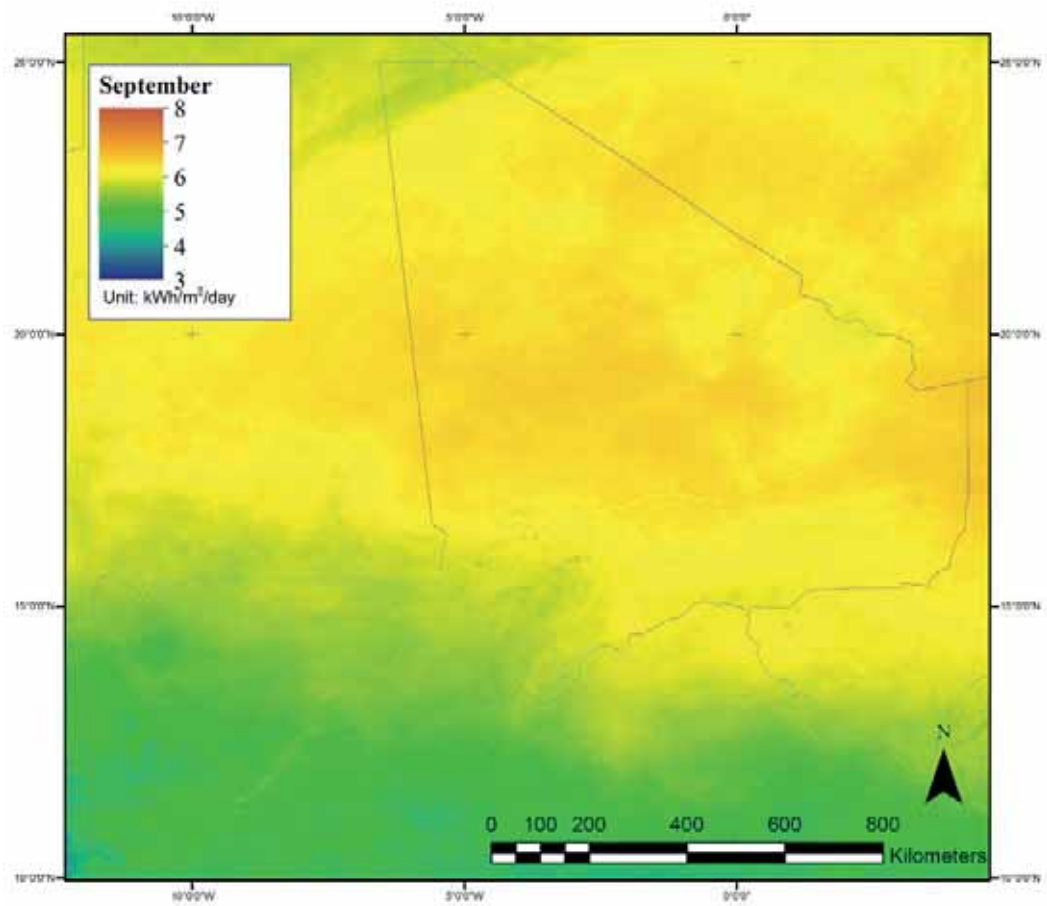




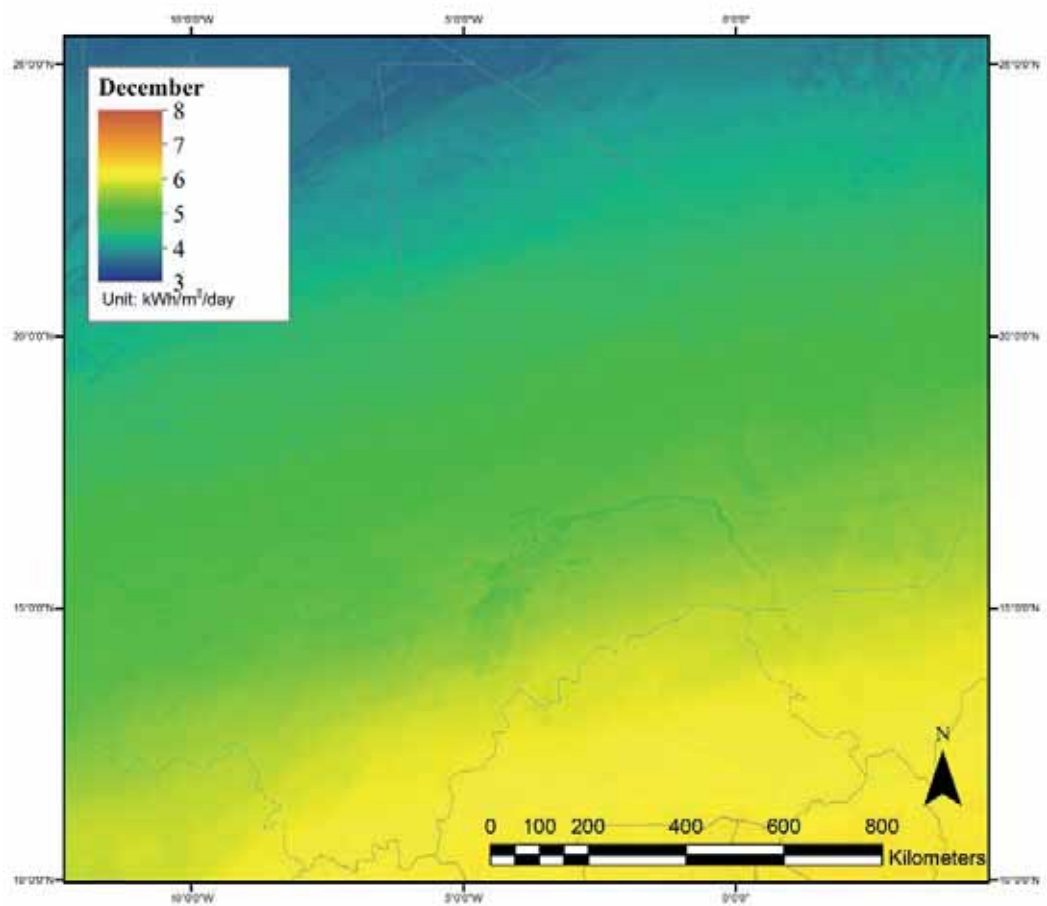
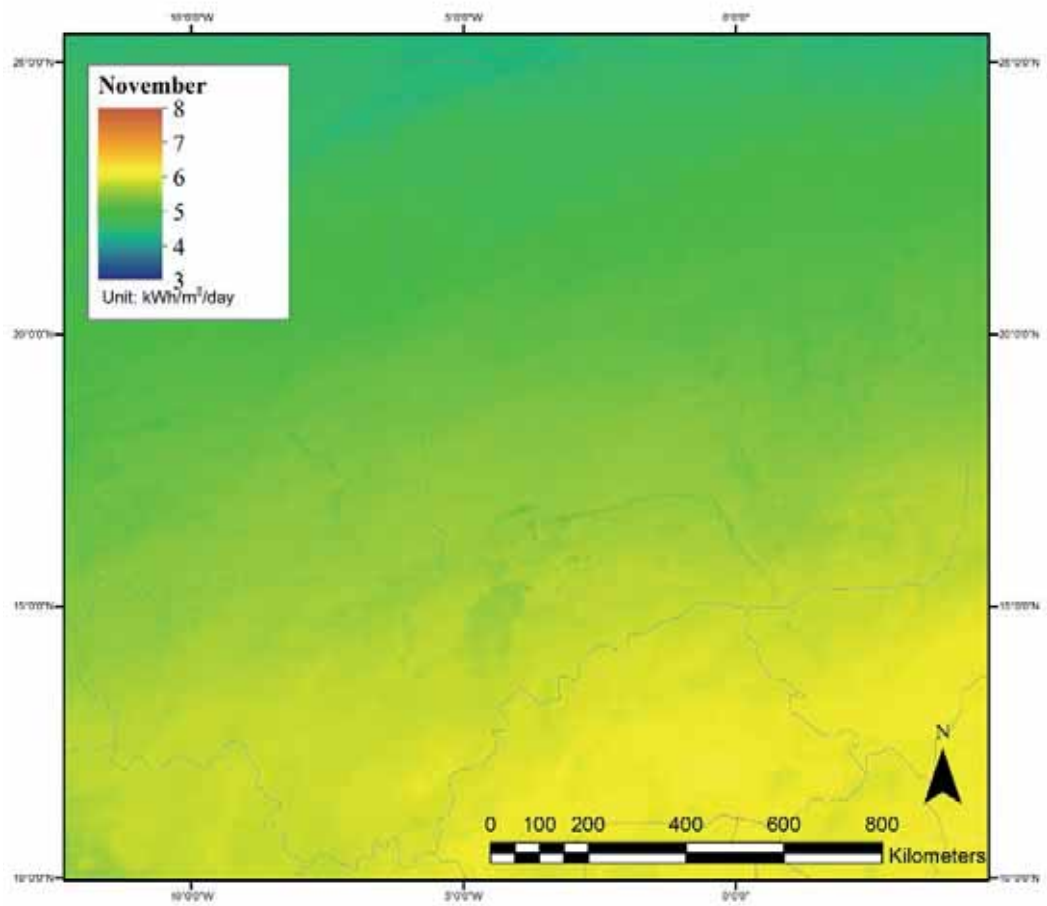












- 5. Moyen quotidien mensuel en kWh/m<sup>2</sup>/jour, résolution de 1 degré, moyen pour les trois années sur lesquelles porte cette étude**

